

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské technologie

# **Konstrukční návrh dokončovacího nástroje**

## Development of the Finishing Tool

*Student: Jan Velčovský*

*Vedoucí bakalářské práce: Ing. Václav Musil*

*Studijní obor: Strojírenská technologie*

*Počet stran:*

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Velčovský**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: Konstrukční návrh dokončovacího nástroje  
Development of the Finishing Tool  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor daného problému.
3. Návrh řešení dané problematiky.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěr.

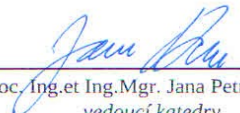
Seznam doporučené odborné literatury:

SHAW, Milton C. *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 0-19-514206-3.  
NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábani*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.  
MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.  
KRATOCHVÍL, Jiří; PETRŮ Jana; PAGÁČ Marek; HOLUBJÁK Jozef; MRÁZIK Jozef. *Effect of chip breakers on the cutting force during the machining of steel C45*. Advances in Science and Technology Research Journal. 2017, 11(1), 173-178. DOI: 0.12913/22998624/66506. ISSN 2299-8624.  
MOHYLA, Miroslav. *Nekonvenční strojírenské materiály I*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-969-7.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Musil**

Datum zadání: 08.12.2017  
Datum odevzdání: 21.05.2018

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21.5.2018



Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále je autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněná v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21.5.2018



Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Jan Velčovský

Adresa trvalého pobytu autora práce: Olomouc, Neředín Jílová č.p. 499/27

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Velčovský, J. *Konstrukční návrh dokončovacího nástroje: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 50 s. Vedoucí práce: Musil, Václav.

Tato bakalářská práce se zabývá jak dokončovacími operacemi, tak i vyhodnocováním vzniklého povrchu během procesů, které odebírají třísku. Zde vznikají plastické deformace a ty ovlivňují jakost výsledného povrchu, na který je stále kladen větší důraz, po konvenčních metodách, jako je například frézování. Potom jsou tu dokončovací operace bez úběru třísky. Zde dochází k plastické deformaci, deformace se projeví v desetinách milimetrů. U těchto metod dochází ke zkvalitnění povrchu nejen tím, že vyhlazují jeho nerovnosti, ale i tím, že je zpevňují a zvyšují tím tak jeho tvrdost. V této práci jsem navrhnul konstrukci ideálního nástroje pro hlazení diamantem a zvolil jsem pro něj vhodné materiály a optimální rezné podmínky dle vědeckých článků, které se zabývaly stejnou problematikou. Na závěr práce jsem odůvodnil, proč jsem volil dané materiály a jaké jsou jejich vlastnosti, výhody a nevýhody v praxi.

## ANOTATION OF BACHELOR THESIS

VELCOVSKY, J. *Development of the Finishing Tool: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining Assembly and Engineering Metrology, 2018, 50 p. Thesis head: Musil, Václav.

This bachelor's degree thesis discusses the finishing operations and evaluates the surface changes that occur during the processes of removing material chips. During conventional methods such as milling, material deformations emerge and hence the material quality is influenced. Yet nowadays, the outcome quality is becoming more and more crucial. As opposed to these conventional methods, there is also the possibility of leveraging methods which do not result in the material chip removal. This method causes material deformations within the range of tenths of millimetres. However, this in fact improves the material's quality not only due to smoothening the surface and hence improving its evenness but also due to strengthening the surface and hence improving its hardness. In this thesis, I have designed the construction of an ideal milling tool using diamond for material smoothing. Furthermore, having had researched various scientific journal articles that discuss this topic, I selected suitable materials for this method and identified the optimal cut characteristics. Lastly, this thesis provides the rationale for the selection of the specific materials and presents their characteristics as well as their practical advantages and disadvantages.

# Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Základní rozdělení dokončovacích operací .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Třískové.....</b>	<b>12</b>
2.1.1. Jemné obrábění .....	12
2.1.2. Honování.....	13
2.1.3. Superfinišování – Mikrofinišování .....	15
2.1.4. Lapování .....	17
2.1.5. Leštění .....	18
2.1.6. Omílání.....	19
2.1.7. Tryskání – Blasting .....	20
2.1.8. Porovnání drsností a přesností u dokončovacích metod s úběrem a bez úběru třísky .....	21
<b>2.2. Beztřískové.....</b>	<b>23</b>
2.2.1. Válečkování .....	24
2.2.2. Tváření diamantem.....	26
2.2.3. Kalibrování.....	27
2.2.4. Vibrační zpevňování .....	27
<b>2.3. Definice a klasifikace zbytkových napětí .....</b>	<b>28</b>
2.3.1. Příčiny zbytkových napětí.....	30
2.3.2. Nedestruktivní metoda měření zbytkových napětí .....	30
<b>2.4. Experimentální zkoumání materiálů při dokončovacím obrábění s ohledem na drsnost povrchu.....</b>	<b>32</b>
2.4.1. Ultrazvukový nástroj s kuličkou (VABB).....	32
2.4.2. Leštění pomocí nástrojů dané rotačně na jeden unašeč .....	33
2.4.3. Zlepšení povrchové úpravy konkávních povrchů pomocí hladícího procesu .....	36
<b>3. Návrh řešené problematiky .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. Vlastnosti použitého materiálu .....</b>	<b>43</b>
3.1.1. Rychlořezná ocel 19 858 .....	43
3.1.2. Hlinitý bronz CuAl10Ni5Fe4 .....	44
3.1.3. 42CrMo4 – Nízkolegovaná ušlechtilá chrom – molybdenová ocel .....	46
3.1.4. Navrhnutí tepelných zpracování u použitých materiálů .....	46

<b>4. Technicko – ekonomické zhodnocení .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1. Pořizovací náklady nástroje .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2. Doba výroby nože .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3. Náklady výroby broušením .....</b>	<b>48</b>
<b>4.4. Náklady výroby hlazením .....</b>	<b>48</b>
<b>4.5. Porovnání metod .....</b>	<b>48</b>
<b>5. Závěr .....</b>	<b>49</b>
<b>6. Citace .....</b>	<b>50</b>
<b>7. Seznam obrázků a tabulek .....</b>	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
<b>8. Přílohy .....</b>	<b>53</b>

## Seznam použitých znaků

Značka	Popis	Jednotka
$A_5$	Prodloužení	[%]
$C$	Speciální tepelná kapacita	[J/gK]
$D$	Směr leštění	[Par/Per]
$E$	Modul pružnosti v tahu	[Mpa]
$F_h$	Hladicí síla	[N]
$F_p$	Přítlačná síla	[N]
HRB	Tvrdost dle Brinella	[-]
HRC	Tvrdost dle Vickerse	[-]
HV	Houževnatost	[J]
IT	Stupeň přesnosti	[-]
$Q$	Tepelná vodivost	[W/mK]
$R$	Elektrický odpor	[Ohm; mm <sup>2</sup> /m]
$R_a$	Střední aritmetická úchylka	[μm]
$R_t$	Největší hloubka drsnosti	[μm]
$R_{p0,2}$	Zátěžový stres	[Mpa]
$R_m$	Konečné namáhání v tahu	[Mpa]
$R_z$	Nejvyšší výška profilu	[μm]
$a_p$	Hloubka záběru	[mm]
$d_A$	Lib.nek.malá oblast	[mm <sup>2</sup> ]
$d$	Vzdálenost mezi soused. rovinami	[mm]
$f$	Posuv	[mm/ot]



$h, k, l$	Millerovy indexy	[mm]
$l_{1,2}$	Horní a dolní přeběh	[mm]
$l_g$	Délka honovacích kamenů	[mm]
$l_z$	Zdvih honovací hlavy	[mm]
$l_w$	Délka honované hlavy	[mm]
$n$	Počet svazků	[-]
$r$	Poloměr zakřivení	[mm]
$v_c$	Rychlost řezného pohybu	[m.min <sup>-1</sup> ]
$v_f$	Řezná rychlost	[m.min <sup>-1</sup> ]
$v_v$	Rychlost leštění	[ot/min]
$\alpha; \beta; \gamma_2$	Teplotní stabilní fáze	[°C]
$2\alpha$	Úhel křížení stop	[°]
$\beta'$	Teplotní nestabilní fáze	[°C]
$\rho$	Hustota	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Bod oscilace	[-]
$\kappa_I; \kappa_{II}; \kappa_{III}; \kappa_{IV}$	Fáze kappa	[°C]
$\lambda$	Vlnová délka	[nm]
$\theta$	Difrakční úhel	[°]

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat především svému vedoucímu práce za cenné informace k dané problematice, za trpělivost a vedení, aby bylo dosaženo stanoveného cíle.

## 1. ÚVOD

V současné době se snaží technologie obrábění využívat moderních výrobních technik i starších osvědčených metod. Proto používá nejvíce produktivních metod a vhodných materiálů, aby dosáhly optimálních řezných podmínek. Každý zákazník má své požadavky, v každém výrobním procesu jsou dané vstupní údaje, například jakost povrchu, geometrická přesnost rozměrů, anebo náklady, které se zajímá zákazník, aby byly co nejmenší. Avšak na jakost povrchu je stále kladen větší důraz. Pod pojmem jakost povrchu se skrývá také drsnost povrchu, přesnost geometrického tvaru a polohy i chemické a fyzikální změny vlastností materiálu v povrchové vrstvě. Při sledování nově vzniklého povrchu je důležité vycházet z toho, že obrábění je řezný proces, ve kterém dochází k plastické deformaci, která značně ovlivňuje právě zmiňovanou jakost povrchu. V této práci jsem se zabýval procesem hlazení pomocí diamantu, čerpal jsem z odborných článků a zkoumal, jaké jsou ideální podmínky pro proces hlazení pro můj navržený nástroj a jak se dané materiály budou chovat při procesu hlazení. Stanovil jsem parametry, kolik bude každá část nástroje stát a jak dlouho se bude tento nástroj vyrábět. Zavedl jsem, jaké pružiny lze použít do navrženého nástroje. Vybral jsem tepelné zpracování každého materiálu a odůvodnil jsem, proč jsem takhle navrhnul mnou zvolenou konstrukci.

Dokončovací operace se mohou dělit podle různých kritérií. Nejčastěji se však dělí na konvenční a nekonvenční. Jako konvenční metody se dají nazvat ty metody, které vycházejí ze základních principů obrábění nebo tváření. Za nekonvenční můžeme označit ty technologie, které nejsou úplně zavedené a využívají jiných než klasických principů. Náznornější rozdělení dokončovacích technologií je však do dvou skupin, a to podle charakteru deformace. Do první skupiny patří metody využívající úběru materiálu, do druhé skupiny patří metody bez úběru materiálu. Mezi dokončovací technologie s úběrem materiálu patří ty technologie, kterými je z povrchu obrobku mechanicky odebrána tříska. K těmto technologiím patří honování, lapování nebo superfinišování. Tyto technologie jsou založeny na mechanické úběru materiálu pomocí brusných zrn. Principem technologií bez úběru třísky je plastická deformace povrchu obrobku. Zde se deformace projevuje jen v desetinách milimetrů, to vede k menším přídávům a tedy k úspoře materiálu, vyplatí se to však u více rozměrových součástí. Největší výhodou těchto metod je zkvalitnění povrchu tím, že vyhladí jeho nerovnosti, a tak dojde ke zpevnění a zvýšení tvrdosti. Díky plastické deformaci vznikají příznivá zbytková tlaková napětí. Tím dochází ke zvýšení odolnosti vůči opotřebení i korozi a také ke zvýšení meze únavy. Mezi tyto technologie patří válečkování, tváření diamantem a otryskávání.

## 2. Základní rozdělení dokončovacích operací

Dokončovací metody v podstatě představují úplně poslední výrobní operaci po hrubování. Účelem dokončovacích metod je dosažení dokonalé jakosti obrobené plochy, vysoké přesnosti daného rozměru, tvaru a polohy. Tyto parametry nám ovlivňují funkčnost, vzhled, životnost nebo spolehlivost. Je nutné však zvolit tu správnou dokončovací metodu, aby splňovala co nejvíce požadavků, nesprávná volba dokončovací metody nám může nepříznivě ovlivnit náklady na výrobu součásti.<sup>1</sup>

Tyto metody lze rozdělit následně:

- Třískové – metody s úběrem třísky
  - Jemné obrábění, hlazení
  - Honování
  - Superfinišování
  - Lapování
  - Leštění
  - Omílání
  - Tryskání <sup>1</sup>
- Beztřískové – metody bez úběru třísky
  - Válečkování
  - Hlazení diamantem
  - Kalibrování
  - Vibrační zpevňování <sup>1</sup>

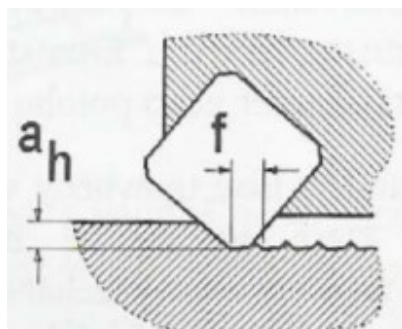
### 2.1. Třískové

#### 2.1.1. Jemné obrábění

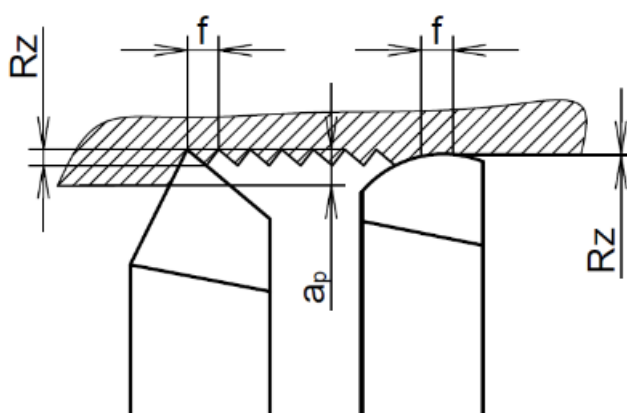
Jemné soustružení – z většiny hledisek nejjednodušší metoda obrábění kovů i nejčastějším používaným procesem. Ekonomicky nejpríznivější metoda dokončovacího obrábění. Pro běžně požadované hodnoty drsnosti a přesnosti jsou  $Ra = (0,4 \div 0,8) \mu m$ , IT 5–6. U všech výrobních metod se volí malý průřez třísky (posuv a hloubka), u hladících nástrojů se volí malý úhel nastavení vedlejšího ostří, obvykle  $1^\circ$  až  $2^\circ$ , případně u hladících nástrojů se volí velký poloměr špičky (50–200 mm i více). Výrobní a dokončovací operaci je možno provádět najednou, buďto například hladící destičkou (obrázek č.1), nebo dvěma noži za sebou (obrázek č.2).<sup>1</sup>

Jemné soustružení – při tomto obrábění každý břit – zub více klínového nástroje odebírá materiál ve formě třísky, krátké třísky měnící se tloušťky. Výhodou je vysoký výkon obrábění,

vynikající jakosti obrobeného povrchu. Vysoká přesnost obrobené plochy. Při jemném soustružení lze opracovávat různé materiály např.: ocel, nerez, uhlík, měď, mosaz.<sup>1</sup>



Obrázek 1 Použití hladící destičky



Obrázek 2 Použití dvou nožů za sebou<sup>1</sup>

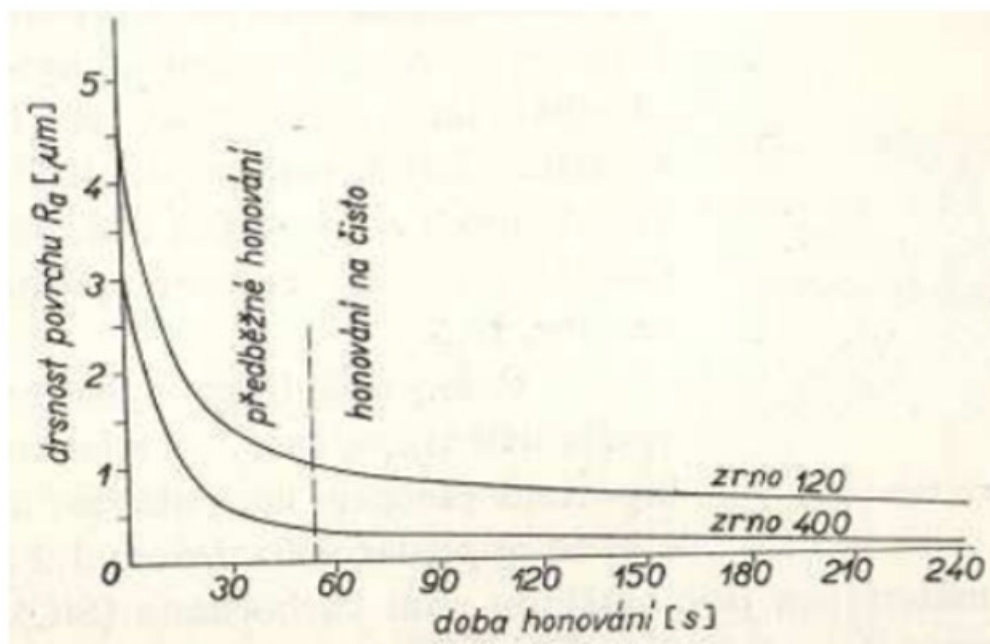
### 2.1.2. Honování

Princip spočívá v tom, že po obvodu honovací hlavy se vloží honovací kameny, lišty nebo kartáče případně tělíska nebo vlákna nanesená na tenkou válcovou stopku. Jejich abrazivním účinkem dochází k broušení jemným brusivem při malých řezných rychlostech se značným využitím procesních kapalin.<sup>2</sup>

Honují se převážně válcové plochy vnitřní i vnější. Avšak častěji se honují vnitřní. Pokud chceme zvýšit kvalitu daného povrchu, můžeme využít tzv. vibrační metody, kdy se na rotační nebo posuvovou část nástroje přidá kmitavý pohyb o amplitudě 1 až 10 mm s frekvencí až 1500 Hz.<sup>2</sup>

Průměry děr, které lze honovat, jsou od průměru 1–750 mm a délky dosahují až do 24 metrů. Materiály nástrojů se nejčastěji vyrábějí z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC nebo diamantu, kterým se dosahuje vyšší trvanlivosti kamenů při několikanásobně větší produktivitě a lepší přesnosti rozměrů, často se používá i grafit, karbid bóru anebo nitrid boru. Řezné a chladicí kapaliny jsou často petrolej nebo

emulze. K honování se používají honovačky axiální, které využívají rotační pohyb (jednovřetenné, vícevřetenné).<sup>2</sup>



Obrázek 3 Graf závislosti drsnosti povrchu na době honování<sup>5</sup>

Nejčastější se dokončují hydraulické, pneumatické a brzdové válce nebo také válce spalovacích motorů, bloky motorů ložiska, ozubená kola. Doporučený rozsah úhlu  $\alpha$  leží mezi  $20^\circ$  a  $55^\circ$ . Při větším úhlu  $\alpha$  se výsledná drsnost povrchu obrobené plochy sníží. Úhel je dán poměrem posuvové rychlosti  $v_f$  a řezné rychlosti  $v_c$ , přičemž platí:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_f}{v_c}$$

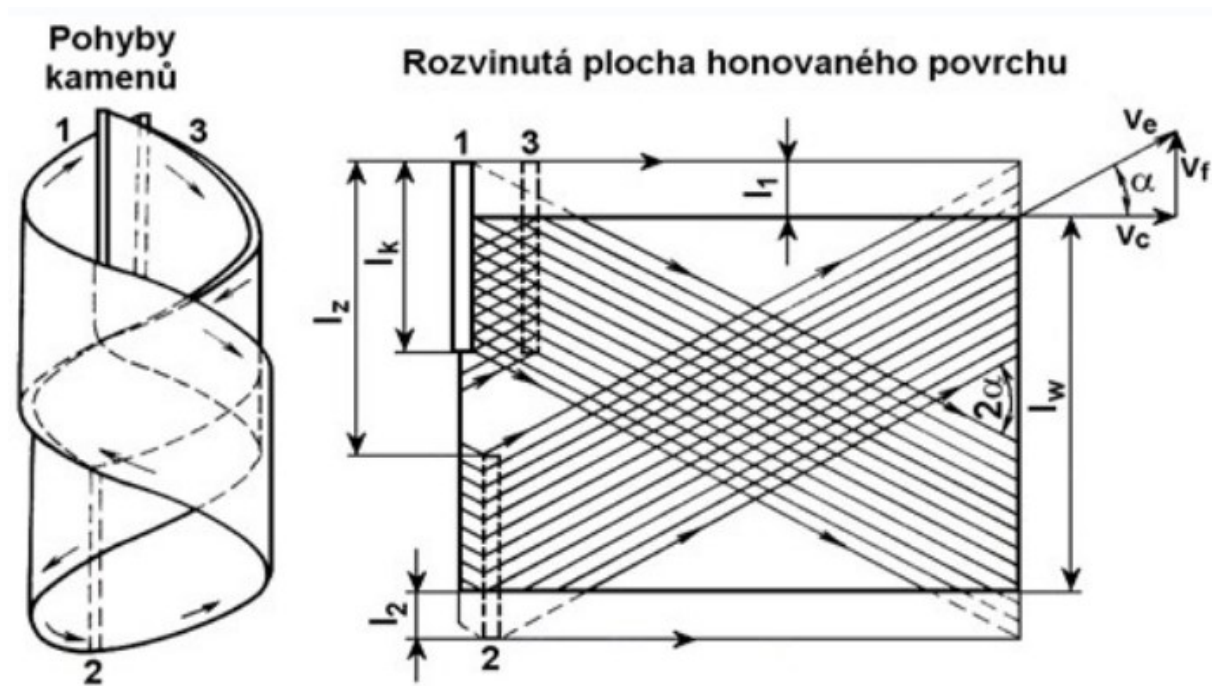
Kde:  $2\alpha [^\circ]$  - úhel křížení drah,

$v_f [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$  - rychlost posuvového pohybu,

$v_c [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$  - řezná rychlost.

Tabulka 1 Dosahovaná přesnost při honování<sup>3</sup>

Honování	Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu Ra $[\mu\text{m}]$
<b>Hrubovací</b>	5 ÷ 6	0,2 ÷ 0,5
<b>Dvoufázové honování</b>	4 ÷ 5	0,1 ÷ 0,2
<b>Velmi jemné</b>	3 ÷ 4	0,025 ÷ 0,1



Obrázek 4 Charakteristický povrch honování – křížové stopy na povrchu obrobku – zadržuje mazivo<sup>5</sup>

Kde: 1. Počáteční poloha honovacího kamene, 2. Poloha honovacího kamene v dolní úvrati, 3. Poloha honovacího kamene po jednom dvoj zdvihu,  $v_c$  – rezná rychlost,  $v_f$  – posuvová rychlost,  $v_e$  – rychlost řezného pohybu,  $2\alpha$  – úhel křížení stop,  $l_w$  – délka honované díry,  $l_k$  – délka honovacích kamenů,  $l_{1,2}$  horní a dolní přeběh,  $l_z$  – zdvih honovací hlavy<sup>5</sup>

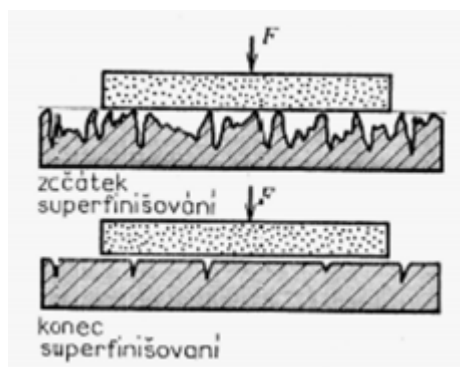
### 2.1.3. Superfinašování – Mikrofinašování

Tato metoda se používá pro vnější válcové plochy převážně (čepy, konce hřídelů, valivé prvky na ložiskách). Nástroj jakožto superfinašovací hlava s brusnými kotouči je přitlačovaná na materiál a koná přímočarý a zároveň kmitavý pohyb. Obrobek koná rotační pohyb. Mezi nástroj a obrobek se přivádí směs petroleje a vřetenového oleje. Tuto metodu charakterizují malé rezné rychlosti. ( $10 - 80 \text{ m.min.}^{-1}$ )<sup>4</sup>

Superfinašování má dvě fáze první je hrubovací a druhá je leštící. Abychom dosáhli největšího uberu a tím i největší produktivity musíme zvolit superfinašovací úhel  $40-60^\circ$ . V leštící fázi se úhel zmenší pod  $40$  stupňů, tím se sníží řezivost kamene a obrobek dostane finální zrcadlovitý povrch. Pro obrábění litin a supertvrdých materiálů se vyrábějí brousící kameny z karborunda. Pro vysoce legované nástroje se zhotovují z kubického nitridu boru.<sup>4</sup>

### Postup:

Na začátku musí působit největší tlak na vrcholcích nerovností, které se tímto vyhlazují. Tím, že nástroj koná kmitavý pohyb, dochází ke zvětšování styčných ploch a tlak pomalu klesá. Na konci superfinišování se přivádí kapalina, která vytvoří na povrchu součásti zrcadlovitý povrch. K superfinišování se používají různé druhy superfinišovacích strojů, soustruhy nebo brusky které obsahují superfinišovací hlavu. Dosahovaná drsnost povrchu se pohybuje od  $(0,02 \div 0,1) \mu\text{m}$ . Stupeň přesnosti je IT4-IT5. <sup>4</sup>



Obrázek 5 Znáznornění superfinišování <sup>4</sup>

Tabulka 2 Řezné podmínky a přídavky pro superfinišování <sup>4</sup>

Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Přídavek	Operace	Úhel křížení	Poměr
počáteční	konečná	[ $\mu\text{m}$ ]		stop $2\alpha$ [ $^\circ$ ]	$V_c/v_f$
1,6	0,16	$10 \div 12$	1	$80 \div 110$	$0,8 \div 1,2$
0,8	0,08	$5 \div 8$	2	$40 \div 70$	$1,5 \div 2,5$
0,4	0,04	$4 \div 5$	3	$20 \div 40$	$3 \div 12$
0,2	0,02	$2 \div 3$	4	méně než 20	$12 \div 28$

Operace: 1,2 – hrubovací fáze superfinišování, 3,4 – jemné superfinišování

#### 2.1.3.1. Izotropní superfinišování (ISF)

Jedná se o speciální technologii, při níž je dosahováno drsnosti povrchu součástí až Ra 0,02  $\mu\text{m}$  a Rz 0,20  $\mu\text{m}$ . Technologie odstraňuje vrcholky povrchu uhlíkových, vysoce legovaných a korozivzdorných ocelí a titanu. Proces probíhá ve vibračních omílacích přístrojích, spolu se speciálními neabrazivními keramickými tělisky a aktivní chemickou směsí. Chemická složka vytváří na povrchu součásti tenkou oxidovou vrstvu, která je díky vibračním odebírána keramickým materiálem. Za stálého přísunu chemické složky jsou tak odstraňovány vrcholky z povrchu až do dosažení dané drsnosti. Následuje oplach s leštěním ve stejném stroji, a to přidáním leštící přísady a vody. Nastavení omílacího stroje zajišťuje velice jemný pohyb součástí



a omílacího média a nedochází tedy k nežádoucímu úběru materiálu. Technologie ISF, aplikovaná s úspěchem na ozubená kola, snižuje namáhání a zvyšuje životnost součástí. <sup>6</sup>



Obrázek 6Před obrobením <sup>6</sup>



Obrázek 7po obrobení <sup>6</sup>

Součást ošetřená technologií ISF:

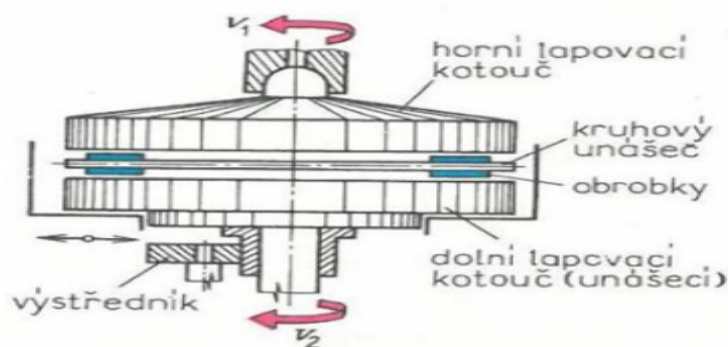
#### 2.1.4. Lapování

Je dokončovací metoda, které se využívá pro dokončení rovinných, válcových a kuželových ploch, vnějších i vnitřních. Touto metodou se dosahuje  $(0,1 \div 0,5) \mu\text{m}$ . Tato metoda absolutně vyhovuje pro dokončování nejčastěji funkčních ploch měřidel (koncové měrky, kalibry, přesná závitová spojení součástí motorů). Tato metoda využívá účinku zrn volného brusiva, přiváděného kapalinou nebo měkkou pastou mezi nástroj a obrobek. Tyto plochy se pohybují při malém tlaku proti sobě, a tak dochází k obrábění na těchto plochách. Lapovací kapalina jsou zrna brusiva z karbidu křemíku, karbidu boru nebo diamantu o velikosti 50 až 250  $\mu\text{m}$  rozptýlena v kapalině. Nástroje pro lapování se vyrábějí z kvalitní jednozrnné perlitické litiny, z mědi, olova. Tyto měkké nástroje umožňují zamáčknutí brusiva do jejich činné části. Lapování lze rozdělit do tří skupin: rovinné lapování, lapování válcových ploch a ruční. <sup>7</sup>

Rovinné lapování se vyznačuje tím, že po jeho proběhnutí jsou na obrobku kruhové stopy po lapování. Používají se pro tuto metodu jednokotoučové nebo dvukotoučové lapovací stroje. Lapování válcových ploch se provádí ve dvukotoučových lapovacích strojích, kde obrobek je uložen tangenciálně v kruhovém unašeči a získává jeho excentrickým pohybem vysokou přesnost tvaru. U ručního lapování záleží, jestli opracováváme vnitřní nebo vnější plochu, podle toho použijeme kroužek nebo lapovací trn. Zde musí být taky přiváděno lapovací medium. Tato metoda je velmi pracná a nedosahujeme s ní tak velké produktivity a je docela drahá. Často se nahrazuje superfinišováním či honováním. <sup>7</sup>

Tabulka 3 Dosahované výsledky při lapování <sup>4</sup>

Lapování	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
	střední	rozsah	střední	rozsah
hrubovací	4	3 ÷ 5	0,2	0,16 ÷ 0,40
jemné	2	1 ÷ 3	0,1	0,08 ÷ 0,16
velmi jemné	-	-	0,03	0,01 ÷ 0,04



Obrázek 8 Princip lapování <sup>4</sup>

#### 2.1.5. Leštění

Jedná se o jednu z nejstarších dokončovacích operací, u které dosáhneme dobré jakosti povrchu (IT 3 ÷ 7) a (Ra 0,1 ÷ 0,4)  $\mu\text{m}$ , avšak nezlepšíme geometrickou přesnost povrchu materiálu. Leštit můžeme buď ručně nebo strojně pomocí hadrového nebo plstěného kotouče upnutého v bruskách nebo leštičkách. Rychlost leštění je okolo 2500  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Z povrchu součásti se odstraňují mikronerovnosti a také i nečistoty ulpělé na povrchu. Leštění se často používá před povrchovou úpravou. Využití v leteckém a automobilovém průmyslu. Obvykle se odstraňování vrcholků nerovností provádí ve třech následujících krocích: <sup>2</sup>

- Hrubování – za pomoci brusných zrn, která jsou pevně spjata s textilním podkladem (písty, kotouče, brousící plátina)
- Jemné leštění – prostřednictvím volně rozptýlených zrn, které jsou v leštící pastě nebo kapalině nanášené na textilní kotouče či pásy.

- c) Dolešťování – bez použití brusiva, pouze přtlakem textilního kotouče nebo pásu, při vyšších rychlostech dochází ke tření a to způsobuje zahřátí a následnou plastickou deformaci vrcholků nerovnosti neboli rozleštění. <sup>2</sup>



*Obrázek 10 Leštění válcové plochy pomocí leštícího kotouče <sup>8</sup>*

#### 2.1.6. Omílání

Omílání nebo také Tumble finishing je proces leštění více malých, drsných, plastových nebo kovových dílů najednou. Omílání je také často označováno jako "hromadné bubnování", protože se používá pro velké dávky dílů spíše než pro jednotlivé kusy. Masové převrácení vyžaduje použití více strojů a celý proces může být v rozmezí od několika minut až po několik hodin. Požadovaný čas závisí na specifikacích hotové součásti. Tumble Finishing je finální fáze omílání, když si zákazník přeje dosáhnout rovnoměrné hladkosti pro součásti výrobku. V závislosti na druhu součásti se doporučují různé typy bubnových úprav. <sup>10</sup>

##### 2.1.6.1. Vysoká energetická přeměna

Pojem "vysoké energetické převrácení" se týká procesu, kdy se odstředivá síla používá k leštění dávky dílů. Tento proces omílání je nejrychlejší, takže je vhodný pro aplikace, které vyžadují rychlé otočení. Vysoké energetické omílání je ideální pro součásti vyrobené z materiálů, jako jsou hliník, titan, ocel a nerez. Proces obracení s vysokou energií využívá vysokoenergetický bubnový stroj, který se skládá z uzavřených sudů, jež se otáčejí na karuselu a vytvářejí odstředivou sílu. Předtím, než je stroj zapnutý a začne se odstředění, je každá hlaveň naplněna médiem, vodou a povrchově aktivním činidlem, potom se přidávají díly, které mají být dokončeny. Spřádací pohyb karuselu vytváří odstředivý efekt tím, že se otáčí jedním směrem a současně tlačí sudy v druhém. Vysokoenergetické bubnové stroje jsou vyráběny v různých

velikostech, v závislosti na počtu a velikosti dílů. Nejmenší velikost je stroj o objemu 12 litrů, ale stroje s objemem 80 litrů, 120 litrů a 160 litrů umožňují širokou škálu velikostí šarží.<sup>10</sup>

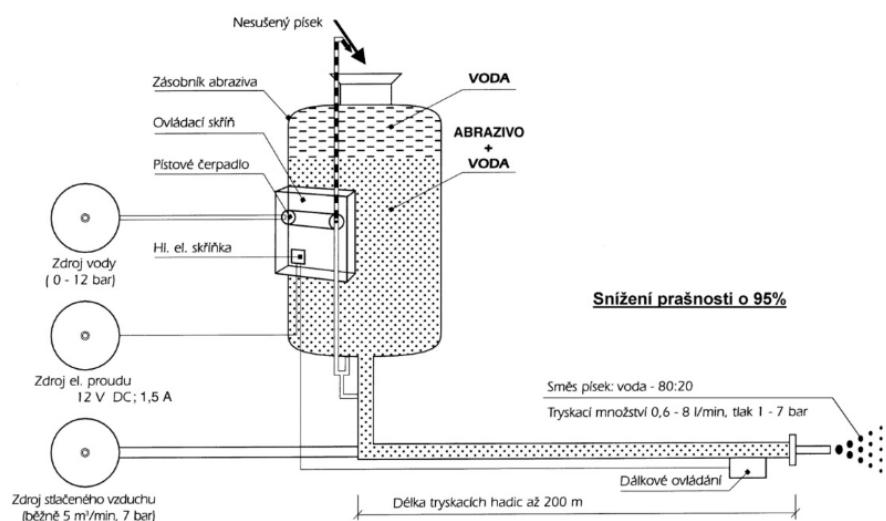
#### 2.1.6.2. Vibrační omílání

Vibrační bubnování je další proces, který se používá při broušení kovových a plastových dílů. Stejně jako vysokoenergetické bubnování kombinuje vibrační bubnování sílu vody a abrazivních médií pro lepší dokončení šarží. Vibrační omílání je jednou z nejstarších způsobů konečné úpravy a používá se již od 40. let! A to díky své efektivitě a schopnosti produkovat extrémně hladké výsledky, a přitom je stále ještě bezpečný i pro nejkřehčí části, vibrační bubnování je stále jedním z nejvíce preferovaných způsobů dokončení. Vibrační bubnování vyžaduje stroj nazývaný vibrační pohánek, který působí rychlou vibraci na součásti ponořené do vody a abrazivní médium. Stejně jako ukládání vysokých energií jsou k dispozici různé velikosti vibračních bubnů pro uložení šarží různých velikostí.<sup>10</sup>

#### 2.1.7. Tryskání – Blasting

Je to proces, při kterém dochází ke zlepšení vzhledu a také drsnosti povrchu. Z tryskové pistole vychází abrazivní materiál s nosným médiem či stlačeným vzduchem, a to dopadá na obrobek pod určitým úhlem. Výsledná struktura lze ovlivnit druhem a zrnitostí brusiva, přiváděným tlakem, úhlem sklonu či vzdáleností trysky od povrchu 20-100 mm.<sup>12</sup>

Používaná abraziva jsou křemičitý písek, ocelová drť, litinová zrna. Rychlost abrazivních částic je až  $120 \text{ m.s}^{-1}$ . V tomto procesu nedochází k tepelnému působení, ale k částečnému zpevnění povrchu. Drsnosti se pohybují okolo  $(0,1 \div 0,8) \text{ } \mu\text{m}$ . Přesnost se u této metody nezlepšuje, ta je dána předchozí operací.<sup>12</sup>



Obrázek 11 Základní princip tryskání<sup>12</sup>

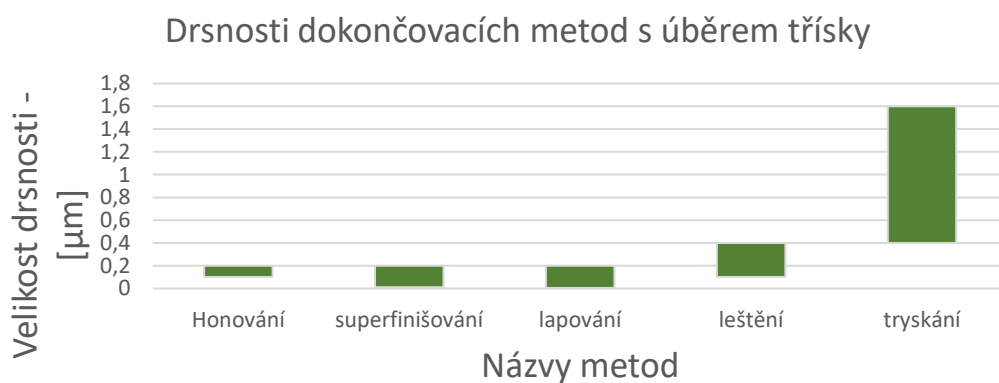
### 2.1.8. Porovnání drsností a přesností u dokončovacích metod s úběrem a bez úběru třísky

#### 2.1.8.1. Porovnání drsností a přesností u dokončovacích metod s úběrem třísky

##### 2.1.8.1.1. Porovnání drsnosti

Nejlepší drsnosti se dosahuje u lapování. Lapování se od ostatních dokončovacích operací liší tím, že k úběru materiálu dochází převážně účinkem zrn volného brusiva, které je přiváděno měkkou pastou nebo kapalinou mezi nástroj a obrobek.

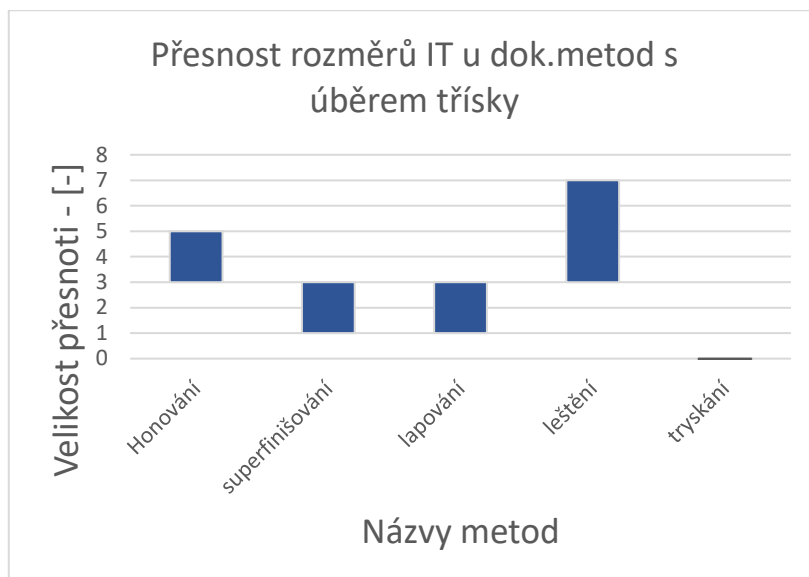
Drsnost Ra u dokončovacích metod s úběrem třísky		
Metoda	Max	Min
Honování	0,1	0,2
Superfinišování	0,01	0,2
Lapování	0,005	0,2
Leštění	0,1	0,4
Tryskání	0,4	1,6



##### 2.1.8.1.2. Porovnání přesností rozměrů

U metody tryskání se nedosahuje zlepšení přesností rozměrů. Proto v grafu nula. Superfinišování a lapování dosahuje co nejvíce přesných rozměrů.

Přesnost rozměrů IT		
Metoda	Max	Min
Honování	3	5
Superfinišování	1	3
Lapování	1	3
Leštění	3	7
Tryskání	-	-

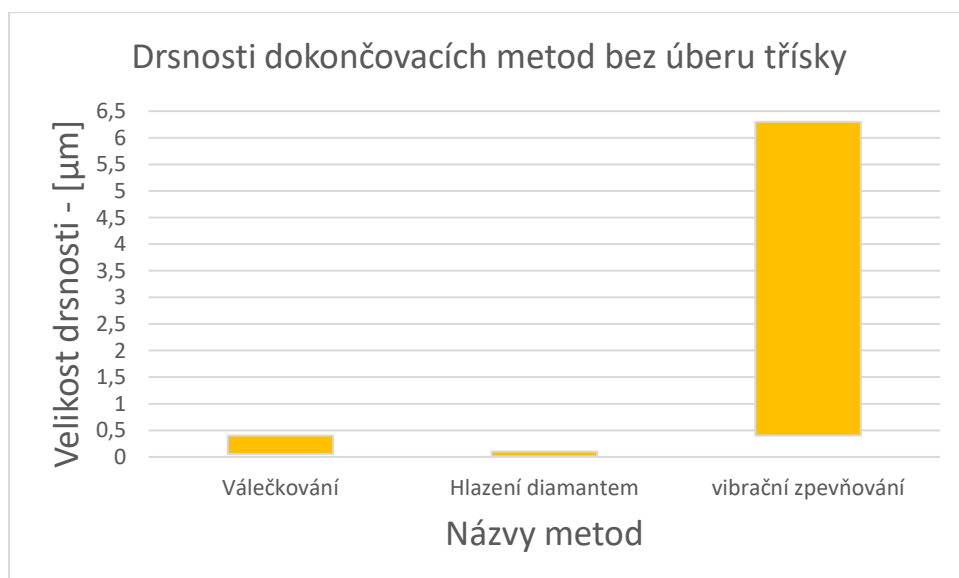


#### 2.1.8.2. Porovnání dokončovacích metod s ohledem na drsnost bez úběru třísky

##### 2.1.8.2.1. Porovnání drsnosti

V následujícím grafu můžeme vidět, že drsnost povrchu je u hlazení diamantem nejlepší, oproti vibračnímu zpevnění, které dosahuje nejmenší přesnosti 0,4  $\mu\text{m}$  což, v některých případech potřebujeme menší.

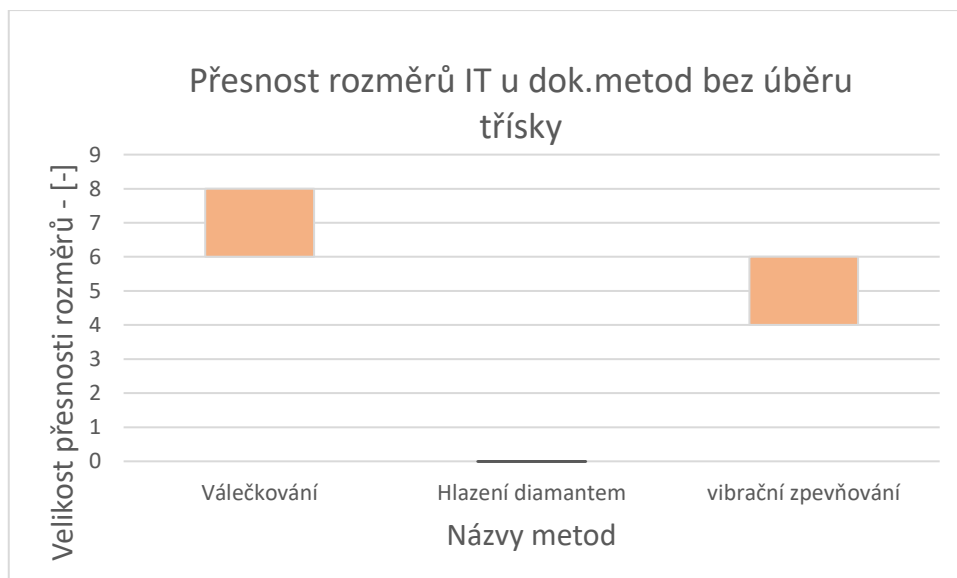
metoda	Drsnost povrchu u metod bez uberu třísky	
	Max	Min
Válečkování	0,05	0,4
Hlazení diamantem	0,009	0,1
Vibrační zpevňování	0,4	6,3



#### 2.1.8.2.2. Porovnání přesností rozměru IT u dokončovacích metod bez úběru třísky

Jak je možné vidět z grafu, tak u hlazení povrchu pomocí diamantu nezlepšuje přesnost rozměrů. U tohohle porovnání je nejlepší vibrační zpevňování, avšak řekl bych, že hlazení pomocí diamantu má celkově víc pozitiv než vibrační zpevňování.

Přesnost rozměrů IT		
Metoda	Max	Min
Válečkování	6	8
Hlazení diamantem	0	0
vibrační zpevňování	4	6



#### 2.2. Beztřískové

Základní princip beztřískových metod dokončování obrobených ploch spočívají v plastické deformaci v povrchové vrstvě obráběného materiálu. Některé metody mají i účinek čištění. Následek plastické deformace je zlepšení parametrů struktury povrchu a dojde ke zvýšení pevnosti a tvrdosti. V povrchové vrstvě vznikají taky tlaková zbytková napětí, to vede ke zvýšení

meze únavy, odolnosti proti opotřebení a odolnosti proti korozi, což příznivě ovlivňuje životnost a spolehlivost obrobku.<sup>1</sup>

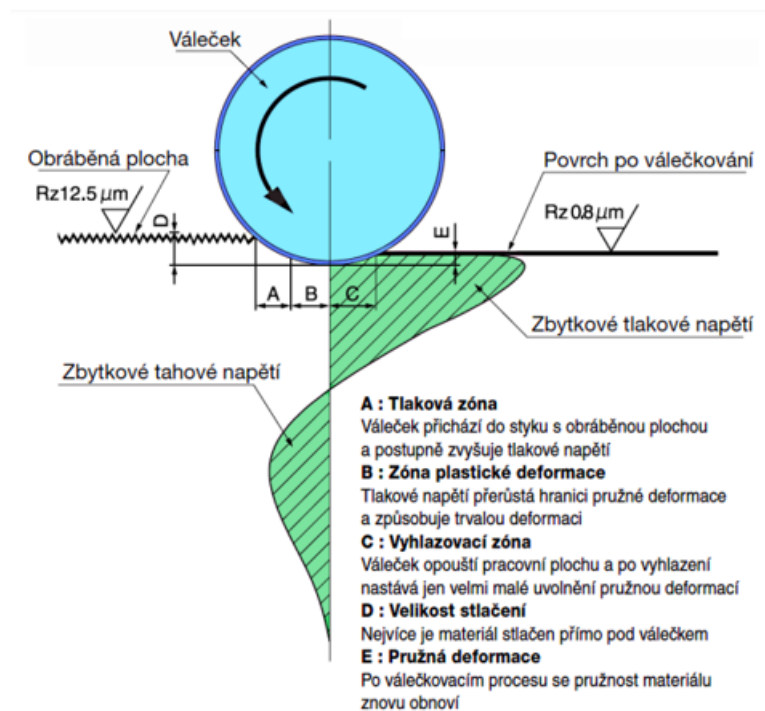
### 2.2.1. Válečkování

Tato dokončovací metoda je založena na principu regulovaného tlaku, který v místě, kde se dotýká nástroj a obrobek, způsobuje plastickou deformaci. Tento jev vede k objemovým i geometrickým změnám. Dochází i k metalurgickým změnám, a to je zpevnění. Toto zpevňování vede ke snížení mikro-nerovností, což ovlivňuje výslednou drsnost Ra. K válečkování se používá jednoho nebo více tvrdých tvářecích prvků (kužele, kotouče) proti povrchu obrobku téměř kolmou silou. Dochází k tzv. odvalování po povrchu součásti. Válečky jsou uloženy v přípravku otočně a na obrobek jsou buď přitlačovány hydraulicky nebo pružinou. Válečkováním se změní rozměr součásti o 0,01 až 0,03 mm, hodnoty rozměrové přesnosti se pohybují v rozsahu IT6 až IT8, drsnost povrchu potom Ra (0,05 ÷ 0,40)  $\mu\text{m}$ .<sup>13</sup>

Zpevňování povrchové vrstvy materiálu strojních součástí, je z hlediska zlepšení mechanických vlastností jakousi prevencí proti vzniku únavového lomu (v provozu velmi častý jev). Válečkováním lze u opracovávané součásti zvýšit odolnost proti únavovým lomům, únosnost, odolnost proti korozi (až 2,5krát) a odolnost proti otěru (1,5 až 6krát). Na druhou stranu se však válečkováním sníží tažnost a vrubová houževnatost. Zlepšení mechanických vlastností lze u strojní součásti získat při poměrně nízkých výrobních nákladech, které jsou dány především vysokou hospodárností a spolehlivostí válečkovacího procesu, krátkými časy tváření a nízkými investičními náklady.<sup>13</sup>

Pro lepší představu celého válečkovacího procesu jsou na obr. 26 zobrazeny zbytkové deformace při válečkování a jednotlivé zóny, kterými dokončovaná plocha během děje prochází. Válečkování obecně se dá aplikovat na obráběcích strojích ať už vrtačce či hoblovce.<sup>13</sup>





Obrázek 12 Průběh válečkování (SUGINO MACHINE LIMITED) <sup>14</sup>

#### 2.2.1.1. Způsoby válečkování

Z hlediska časového průběhu velikosti tvářecí síly dělíme válečkování na statické a dynamické.

##### 2.2.1.1.1. Statické válečkování

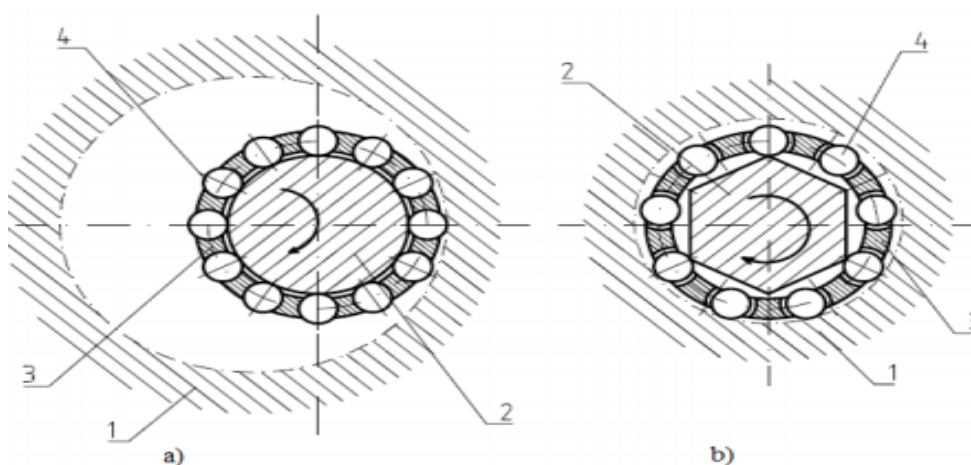
U statického válečkování dochází k plastické deformaci povrchu díky otáčejícímu se válečku, který je upnut v držáku, který je během válečkování neustále ve styku s opracovávanou plochou obrobku. Výsledný efekt pak závisí na průměru aktivního povrchu nástroje. Větším průměrem zajistíme nižší drsnost povrchu, menším průměrem zase zvýšíme hloubku zpevněné vrstvy. Využití statického válečkování je zejména v kusové výrobě, případně v sériové výrobě pro dokončování rozměrnějších výrobků. Zde tvářecí síly nevykazují dynamický účinek, tzn. tvářecí síly jsou po celou dobu konstantní nebo se nepatrně mění. <sup>1,4,14</sup>



Obrázek 13 Nástroj pro statické válečkování vnějších válcových ploch citace 15

#### 2.2.1.1.2. Dynamické válečkování

Dochází k plastické deformaci povrchu působením časově omezeného silového impulsu válečku. Tento váleček pod určitou frekvencí působí na tvářený povrch obrobku. Tzn. že nástroj není pod neustálým kontaktem s povrchem obrobku a koná navíc ještě kmitavý pohyb. Pohybová neboli kinetická energie válečku se získává z rotujícího trnu, kroužku s vačkovými plochami nebo magnetickým rezonátorem. Tento způsob válečkování dosahuje sice vyššího zpevnění, ale má to dopad na úkor drsnosti, která dosahuje max.  $R_a (0,8 \div 0,2) \mu\text{m}$ .<sup>1,4,14</sup>



Obrázek 14 a) staticky pracující nástroj b) dynamicky pracující nástroj<sup>16</sup>

- Kde:
- 1 – obrobek
  - 2 – těleso nástroje
  - 3 – klec
  - 4 – tvářecí tělíska<sup>16</sup>

#### 2.2.2. Tváření diamantem

Tato beztržisková metoda dokončování vznikla z předešlé operace válečkování, pouze nedochází k takzvanému odvalování nástroje po daném povrchu, ale ke kluznému tření. K plastické deformaci dochází tak, že se diamant, který je v nástroji připevněný a má stanovený poloměr se přitlačí tlakem, který se dá dle potřeby regulovat. Tato operace lze provádět u supertvrdých materiálů. Používá se monokrystalický diamant, jelikož je tvrdší než přírodní. Dost značnou výhodu má lesk hotové součásti. Drsnost vyhlazené plochy závisí na materiálu součásti a pracovních podmínkách a může po jednom až třech průchodech nástroje dosáhnout hodnot kolem  $R_a 0,1$  až  $0,4 \mu\text{m}$ .<sup>4</sup>

Mezi nástrojem a povrchem dochází ke smykovému tření a vzniká teplo, a to se nejvíc odvádí do diamantu, který je známý tím, že vede dobře teplo, proto musí být intenzivně chlazený, jinak by byl poškozen. Toto chlazení a mazání zvyšuje životnost diamantu. Jako chladicí emulze se často používají syntetické chladicí kapaliny. Nástroj, ve kterém je umístěn samotný diamant, obsahuje často pružinu, která s regulovaným tlakem zaručuje to, aby diamant kopíroval přesný tvar povrchu součásti lze však využít i jiných technik například magnetu, ultrazvukovými vibracemi, hydraulickým tlakem, nastavitelným šroubem, který vyvodí přitlačnou sílu pomocí závitů v těle nástroje. Drsnosti povrchu se dosahuje až  $Ra = 0,1\mu m$ . Nelze však ale takto upravovat tvarové úchytky v důsledku zmiňovaného přesného kopírování povrchu nástrojem, oproti válečkování což je značnou nevýhodou.<sup>18,19</sup>

### 2.2.3. Kalibrování

Kalibrováním se zvyšuje rozměrová a tvarová přesnost, zmenšuje se drsnost obrobené plochy a zpevňuje se povrchová vrstva materiálu taktéž plastickou deformací. Tato deformace je způsobena přímočarým pohybem nástroje, který má přesnost větší přibližně o pár tisícín milimetrů než rozměr díry. Pohyb je vyvozován mechanicky, hydraulicky, pro vnitřní povrchy i rázem tlakové kapaliny nebo výbuchem Kalibrování se provádí jen na lisech. Drsnost povrchu je ovlivněna rychlostí pohybu, která je až  $80m \cdot min^{-1}$ , tzn. čím větší rychlost, tím menší přesnost. Obvykle se drsnost pohybuje ( $0,4 \div 6,3$ )  $\mu m$ . Nástrojem může být kulička, speciální trn, objímka nebo hladící zuby protahovacích (protlačovacích) nástrojů. Dochází ke zpevnění povrchu a zpřesnění rozměrů – zkalibrování (IT4  $\div$  IT6), a to při dosahované drsnosti povrchu  $Ra$  ( $0,005 \div 0,400$ )  $\mu m$ .<sup>2,12</sup>

### 2.2.4. Vibrační zpevňování

Jako u předešlých dvou metod dochází k plastické deformace, která je způsobena dopadem částic. Vibrační proto, protože vibracemi se tyto částice urychlují, vyvolávají se mechanicky nebo ultrazvukem.

- Mechanicky – speciálnímu zařízení je udělován kmitavý pohyb ve třech osách. Dokončování se realizuje dopady částic. Podmínky jsou voleny tak, aby výsledný vektor jejich výsledného zrychlení byl kolmo k obráběné ploše. Jako dopadající části se používají litinové/ocelové kuličky. Tento materiál se volí z toho důvodu, aby kuličky měly nejvyšší hmotnost.
- Ultrazvukem – pevný nástroj je tvořen nástavcem, který obsahuje zdroj ultrazvukových kmitů a opírá se o upravovaný materiál – vyhlazování. Pevně upnutý obrobek je v zásypu ocelových kuliček, které přenášejí vibrace z nástavců uložených na stěnách zařízení.<sup>12</sup>

### 2.3. Definice a klasifikace zbytkových napětí

Zbytková napětí mohou být:

- 1) Užitečná – např. kuličkováním se vnesou tlaková napětí v povrchové vrstvě, která vedou k prodloužení životnosti součásti.
- 2) Škodlivá – vznik trhlin, napěťová koroze, snížení meze únavy či křehkolomové odolnosti (negativní vliv zejména u tahových zbytkových napětí).<sup>19</sup>

Vliv válečkování na životnost dynamicky namáhaných součástí:

Obdobně jako v případě obrušování součásti v bubnech neeliminuje tato metoda celkové zbytkové napětí vyvolané broušením, ale způsobuje tlaková napětí pomocí zplastizování povrchové vrstvy. Tlaková pnutí na povrchu válečkované plochy zbrzdí rozvoj trhlin a eliminují vliv mikrovrubů.<sup>19</sup>

Zbytková napětí mohou být definována jako napětí, která zůstávají v materiálu nebo jeho těle po výrobě a zpracování materiálu při absenci vnějších sil nebo teplotních gradientů (teplotní rozdíly). Mohou být také produkovány provozním/servisním načítáním, což vede k nehomogenní plastické deformaci části nebo vzorku. Dojde ke zhoršení například odolnosti proti dynamickým zatížením, opotřebení, korozivzdornosti, jakosti povrchové vrstvy a rozměrové přesnosti.<sup>19</sup>

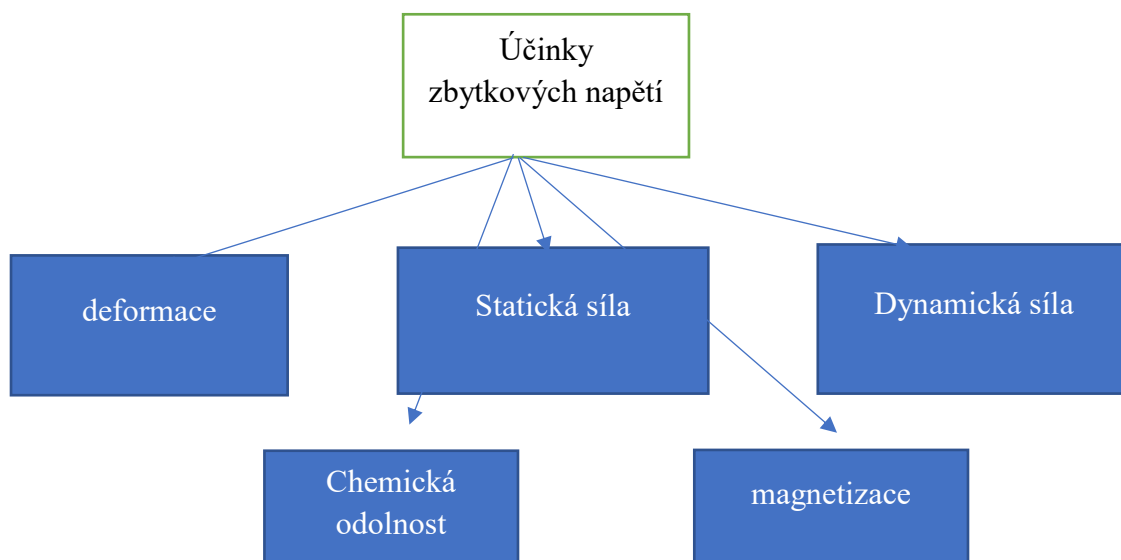
Mechanismus vzniku zbytkových napětí:

- a. Nerovnoměrná plastická deformace. Například při obráběcích procesech, kdy dochází k přetváření povrchu.
- b. Nerovnoměrný ohřev. Oblasti jsou různě zahřáty a vlivem nerovnoměrného ochlazení a tepelných gradientů vznikají zbytková napětí.
- c. Strukturní napětí. Vznikají vlivem nerovnoměrné strukturní transformace. Změny mohou být vyvolány i během procesu obrábění, kdy dochází k rychlému ohřevu a ochlazení. Dochází k absorpci látek (plynů) do povrchové vrstvy.<sup>19</sup>

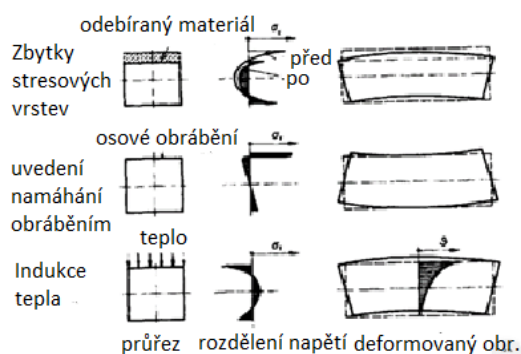
Zbytková napětí rozlišujeme buď tahová nebo tlaková. Nebo je můžeme dělit dle příčiny vzniku, a to na napětí vložena a vnitřní. **Tlakové** zbytkové pnutí jde označit za příznivější pro zmíněné vlastnosti. Podle toho, v jak velkém objemu dosahují zbytková napětí rovnováhy, jsou rozdělována na:

- Zbytková napětí I. druhu (makroskopická)
- Zbytková napětí II. druhu (mikroskopická)
- Zbytková napětí III. druhu (submikroskopická)<sup>19,20</sup>

Procesy obrábění, které vytvářejí funkčně relevantní plochy součástí, mají velký význam pro vývoj fyzikálního stavu povrchu a rozložení zbytkového napětí v něm. Pro mnoho aplikací jsou vlastnosti povrchu části dominantní pro funkční chování celé komponenty. Na schématu můžeme vidět shrnutí nejdůležitějších účinků zbytkových napětí na mechanických a elektrických součástech.<sup>19,20</sup>



Zbytková napětí působí v těle bez vnějších sil nebo momentů. Vnitřní síly tvoří systém, který musí být v rovnováze. Pokud je kterákoliv část odebrána, například obráběním, je stav rovnováhy obecně narušen a tělo musí reagovat deformacemi. Jedná se o efekt dobře známý, který řeší inženýři stále. Například u obrábění odlitků. Pokud odlitek není tepelně zpracován-ošetřen pro odlehčení napětí a pokud se nesymetricky obrábí, dochází ke značné deformaci. To je důvodem, proč zkušený pracovník uvolní upínací síly obrobku po hrubování a dojde k odlehčení velké části stlačeného materiálu před dokončením. Deformace části je zhruba proporcionální k odstranění průřezu materiálu. Při následném dokončení jsou odstraněny pouze tenké vrstvy, takže jsou minimalizovány škodlivé účinky zbytkových napětí z procesu lití. Tento efekt nesmí být smíchán se vstupem stálého namáhání obráběním. Můžeme vidět na schématu číslo 2.<sup>20</sup>



Obrázek 15 Deformace v obrobku během obrábění<sup>20</sup>

$$\int \sigma dA = 0 \quad (\text{vztah 1.})$$

$$\int \sigma_z dA = 0 \quad (\text{vztah 2.})$$

Kde  $\sigma$  je bod oscilace,  $dA$  je libovolně nekonečně malá oblast ve svařovaném prvku. Zbytkové napětí z plastické deformace nebo z metalurgických transformací. Tato zbytková napětí mají pouze omezenou hloubku průniku běžně sto milimetrů. Ale hlavně pro tenké obrobky, to může také vést k příslušným deformacím. Plánováním 1 m dlouhého nosníku o tloušťce 20 mm může být výchylka asi 1 mm. Během procesu obrábění nebo krátce poté tepelné vlivy mohou způsobit další deformace. Během obrábění lze obrobek zahřát asymetricky. Tímto teplotním profilem a tepelní roztažností vede tepelné napětí k deformaci a sníží se kompenzování teploty.<sup>20</sup>

### 2.3.1. Příčiny zbytkových napětí

Zbytková napětí jsou generována během většiny výroby procesy zahrnující materiálovou deformaci, tepelné zpracování, obrábění nebo zpracování, které transformují tvar nebo změnu vlastností materiálu. Vycházejí z čísla zdrojů a může být přítomen v nezpracované surovině, zavedeny během výroby nebo vznikly při provozním zatížení. Je možné klasifikovat původ zbytkových napětí v následující cestě:<sup>20,21,22</sup>

- diferenční tok plastu;
- diferenciální rychlosti chlazení;
- fázové transformace se změnami objemu apod.

Například přítomnost tahových zbytkových napětí v části nebo strukturální prvek jsou obecně škodlivé, protože mohou přispět a jsou často hlavní příčinou únavové poruchy a stresové koroze praskání. Opravdu jsou vyvolány tlakové zbytkové napětí různými prostředky v (pod) povrstvových vrstvách materiálu, jsou obvykle prospěšné, protože brání vzniku a šíření únavy prasklin a zvyšují odolnost proti opotřebení a korozi. Příklady operací, které produkují škodlivé namáhání v tahu, jsou svařování, obrábění, broušení a tažení tyčí nebo drátů. Existují další efekty, jako jsou optické, akustické nebo tepelné výsledky zbytkových napětí.<sup>20,21,22</sup>

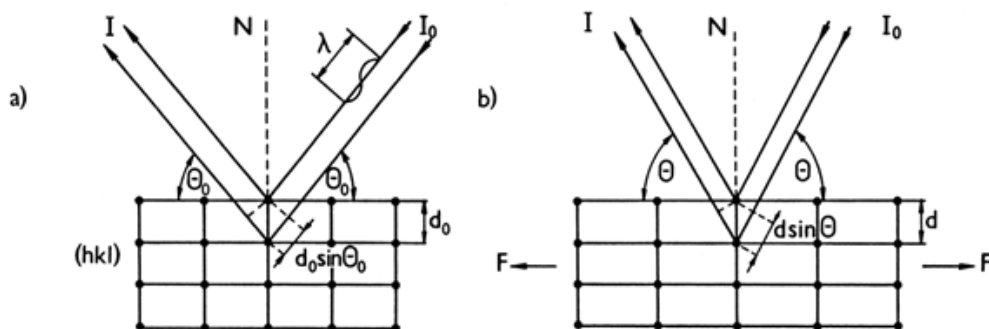
### 2.3.2. Nedestruktivní metoda měření zbytkových napětí

#### Rentgenová difrakce

Principem rentgenového prozáření je rozptyl rentgenových paprsků na krystalové mřížce materiálu. Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou  $\lambda \cong 10$  až  $0,01\text{nm}$ , které vzniká po dopadu termálně vyzařovaných a urychlených elektronů na kovový materiál, např. kobalt nebo Měď. Rentgenové záření, které je po filtraci monochromatické, se částečně

absorbuje do materiálu a částečně se pod určitým úhlem od materiálu odrazí, čímž dojde k rozptylu záření tzv. difrakci.<sup>24</sup>

Podstatou rentgenové tenzometrie, pro měření zbytkových napětí, je tedy rozptyl, difrakce, rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím, jak je znázorněno na obrázku číslo 5, tzn. že změna meziorovinné vzdálenosti se projeví změnou Braggova úhlu.<sup>23</sup>



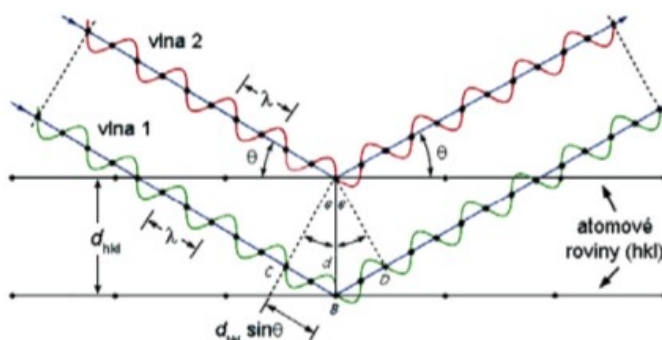
Obrázek 16 a) Nenapjatý stav, b) napjatý stav<sup>23</sup>

Deformace vzdáleností mřížkových rovin (hkl) a změny úhlové polohy interferenčního maxima;  $I_0$  a  $I$  jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou  $F$ .<sup>25</sup>

Rozptylem záření na sousedních mřížkových rovinách vyniká tzv. interferenční maximum ve směru difrakčního úhlu  $\theta$ . Tento difrakční úhel  $\theta$  je dán tzv. Braggovým vztahem,  $n\lambda = 2d \sin\theta$ .<sup>26</sup>

Kde:  $k, h, l$  – Millerovy indexy  
 $d$  – vzdálenost mezi sousedními rovinami v krystalické mřížce

Podmínkou pro vznik difrakce, tedy pro vznik Braggova vztahu je, že „každá rovina v krystalu rozptílí určité množství záření, ale výsledný rozptyl od velkého počtu rovin bude mít dostatečnou intenzitu pro pozorování, pokud se vlny vycházející od všech rovin navzájem zesílí.“<sup>26</sup>



Obrázek 17 Odvození Braggova vztahu<sup>26</sup>

## 2.4. Experimentální zkoumání materiálů při dokončovacím obrábění s ohledem na drsnost povrchu

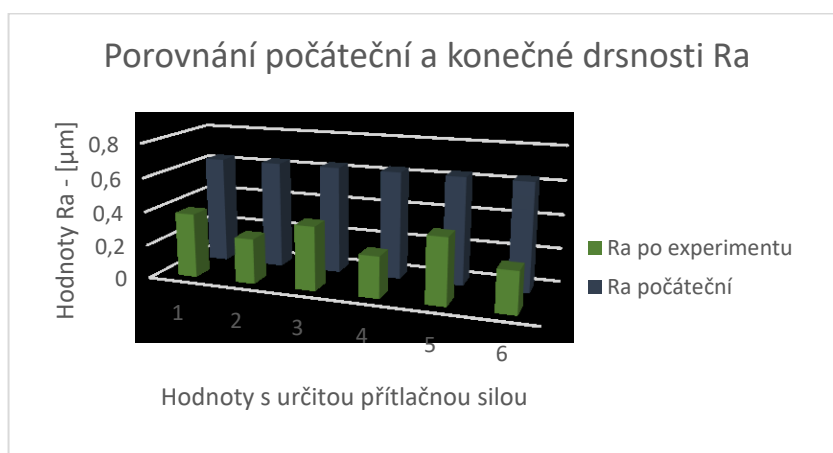
### 2.4.1. Ultrazvukový nástroj s kuličkou (VABB)

Tento proces je založen na modifikaci konvenčního míšení leskem, a to přidáním vibrační síly k předběžnému zatížení vyvíjenému pružinou uvnitř nástroje. Pro účely úspěšného provádění procesu je navržen nástroj, který je sestaven ze tří modulů, které plní každý svou funkci. Překrytí vibrací má pozitivní výsledky snižovat řezné síly při obrábění v důsledku variability délky dotyku mezi nástrojem a materiálem. Podpora vibrací také zesiluje plastické deformační procesy. Vstupní parametry jsou kmitočet 40kHz a amplituda 10μm. Účinnost prototypu je testovaná na plochém povrchu Ti-6Al-4V. Posuzuje se zdokonalení povrchu dodáním vibrační síly nad statické předpětí. Drsnost povrchu a tvrdost jsou výsledkem všech testovaných podmínek <sup>17</sup>

Tabulka 4 Zkušební podmínky a výsledky experimentu <sup>17</sup>

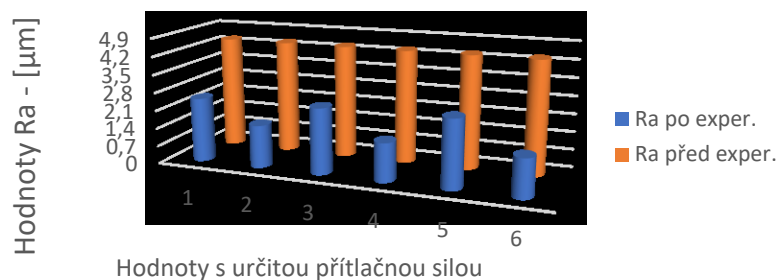
Zkušební podmínky			Drsnost Ra (μm)		Drsnost Rt (μm)		Tvrdost HV50	
A (%)	F <sub>p</sub> (N)	n <sub>p</sub>	Průměr	Stand.odchylka	Průměr	Stand.odchylka	průměr	Stand.odchylka
0	100	1	0,378	0,0234	2,502	0,1235	414	11
0	300	5	0,264	0,0342	1,659	0,1245	482	12
50	100	1	0,374	0,0124	2,567	0,0997	432	14
50	300	5	0,241	0,0245	1,502	0,1123	544	12
100	100	1	0,387	0,0412	2,654	0,2031	464	11
100	300	5	0,243	0,0247	1,499	0,1347	558	14
poč. povrch			0,634	0,0347	4,417	0,2101	400	9

Při operaci byla vybrána hodnota 60 mm / min, což je hodnota, která se obvykle používá pro provedení dokončovacího průchodu na tento typ slitiny titanu. Hodnotila se průměrná a celková drsnost povrchu a tvrdost dle Vickerse(HV50). Průměrná drsnost se zlepšila o 61,6 %, průměrná o 66,1 %. Největší tvrdost byla 558 ± 14 HV0.005. <sup>17</sup>





### Porovnání počáteční a konečné drsnosti Rt



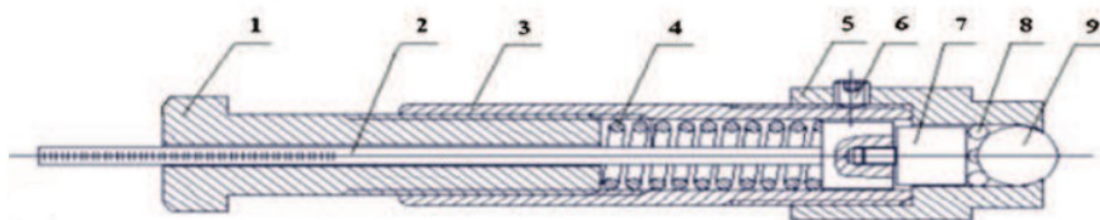
### Porovnání tvrdostí HV



#### 2.4.2. Leštění pomocí nástrojů dané rotačně na jeden unašeč

Nově vyvinutý nástroj pro leštění kuliček byl navržen a testován pro povrchovou úpravu velkých plochých ploch v co nejkratším čase. Analýza procesu leštění byla prováděna na ocelových listech AISI 1010 metodou Taguchi a metodou (tj. rychlost řezání, hladicí síla a rychlost posuvu) na drsnost povrchu, povrchovou tvrdost a mikrostrukturu leštěných povrchů. Počáteční tvrdost byla naměřena na  $59 \pm 1$  HRB. Průměrná drsnost povrchu (Ra) leštěného materiálu byla  $2,48 \pm 0,4$   $\mu\text{m}$ . Průměrná drsnost a tvrdost se vypočítají průměrem s deseti měření na různých místech povrchu obrobku.<sup>27</sup>

V této studii byla použita kulička pro leštění o průměru 10 mm. Je vyrobena z uhlíkaté a chromové oceli s maximální drsností 0,04 micrometrů a tvrdostí 62-65HRC. Pružina, umístěná nad hladíčovými kuličkami, se používá k aplikování potřebné síly. (viz. Obrázek 16)<sup>27</sup>



Obrázek 18 schéma konvenčního nože který je použit na rotační desce 4krát po 90 stupních

Kde:

1, je utahovací šroub 2, stupňovitá stopka 3, tělo 4, pružina 5, blokovací šroub 6, adaptér 7, uchopení 8, opěrné kuličky 9, leštící hrot.<sup>27</sup>

#### 2.4.2.1. Experimentální návrh a analýza

Byly vybrány tři parametry leštění pro optimalizaci procesu leštění metodou Taguchi1, rychlost leštění, 2, síla 3, rychlost posuvu, další parametry jako průměr kuličky, počet průchodů a hloubka pronikání, jsou v průběhu považovány za konstantní. Jako chladicí emulze byl použit olej ESSOLUBE15W-40. Pro každý parametr bylo zvažováno pět úrovní. Základní parametry pro leštění (viz tabulka 5).<sup>27</sup>

Tabulka 5 Parametry pro leštící proces

Činitelé	Symbol	Úrovně				
		-2	-1	0	1	2
Rychlost - ot/min	$x_1$	67	151	235	319	403
Síla - N	$x_2$	200	300	400	500	600
Posuv - mm/ot	$x_3$	0.1	0.18	0.26	0.34	0.42
Rozměry hrotu - mm		10				
Počet průchodů		2				
Leštící hloubka - mm		0.2				
Podmínky leštění	Mazané					

Tabulka 6 Experimentální výsledky kvality povrchu <sup>27</sup>

číslo pokusu	Rychlost – ot/min		Síla – N		Posuv – mm/ot		Výsledky	
	kódovaná h.	skut.h.	kódovaná h.	skut.h.	kódovaná h.	skut.h.	Ra – μm	Tvrдост HRB
1	-2	67	-2	200	-2	0,1	0,95	66,2
2	-2	67	-2	300	-2	0,18	2,37	66,4
3	-1	151	-1	400	-1	0,34	2,79	65,9
4	-1	151	-1	500	-1	0,42	1,42	66
5	0	235	0	500	0	0,1	2,01	64,4
6	0	235	0	600	0	0,18	1,78	70,7
7	1	319	1	200	1	0,34	0,89	62,2
8	1	319	1	300	1	0,42	1,3	62,9
9	2	403	2	300	2	0,1	2,31	64,8
10	2	403	2	400	2	0,18	2,29	64,6

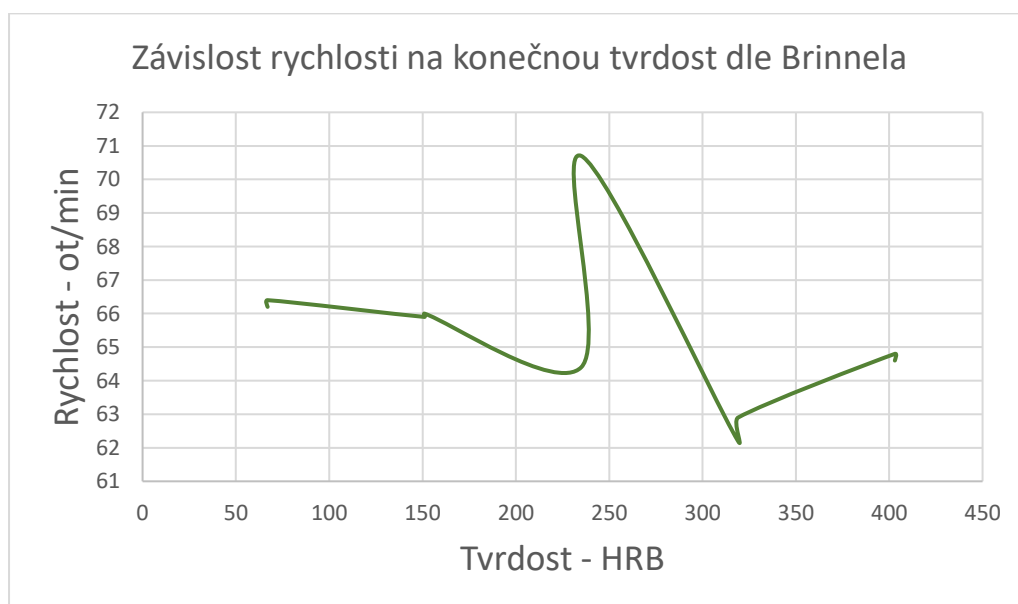
Výsledky měření pomocí metody Taguchi s kombinací hodnot s tabulkou č. 5. Každý parametr byl kódován. Bylo použito pět kódovaných úrovní (-2 -1 0 1 2) za použití následujících transformačních rovnic: <sup>27</sup>

$$x_1 = \frac{n-235}{84} \quad (\text{Ekv 1})$$

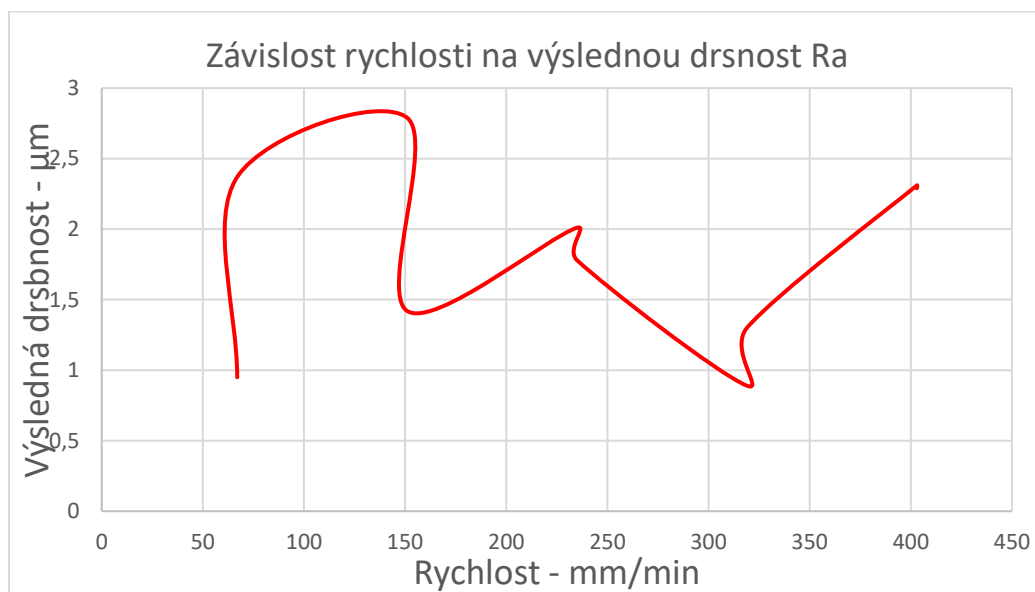
$$x_2 = \frac{F-400}{100} \quad (\text{Ekv 2})$$

Kde:  $x_1, x_2, x_3$  označují rychlost, sílu a posuv <sup>27</sup>

$$x_3 = \frac{f-0,26}{0,08} \quad (\text{Ekv 3})$$



Z uvedeného grafu můžeme vidět, že nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo při rychlosti 235 ot/min, při vyšších rychlostech se nedosahuje tak nízké drsnosti, která je u tohoto procesu důležitá.



Z grafu závislosti rychlosti na výslednou drsnost můžeme vidět, že při rychlosti 319 ot/min je dosaženo té nejlepší drsnosti. Rychlost měla největší vliv jak na výslednou drsnost, tak i tvrdost.

Použitím výsledků z tabulky byla zjištěna drsnost povrchu, tvrdost ocelových desek AISI:

Hladicí síla ze začátku vycházela 500 N, ale bylo zjištěno, že při tak velké síle se materiál lehce odlupuje a je třeba zvolit 400 N, při takové síle už nedocházelo k tomuto jevu. <sup>27</sup>

Tabulka 7 Ideální řezné podmínky stanovené Taguchi metodou <sup>27</sup>

rychlost leštění – $v_v$ [ot. /min]	rychlost posuvu – $f$ [mm/ot.]	Hladicí síla – $F_n$ [N]
235	0,18	400

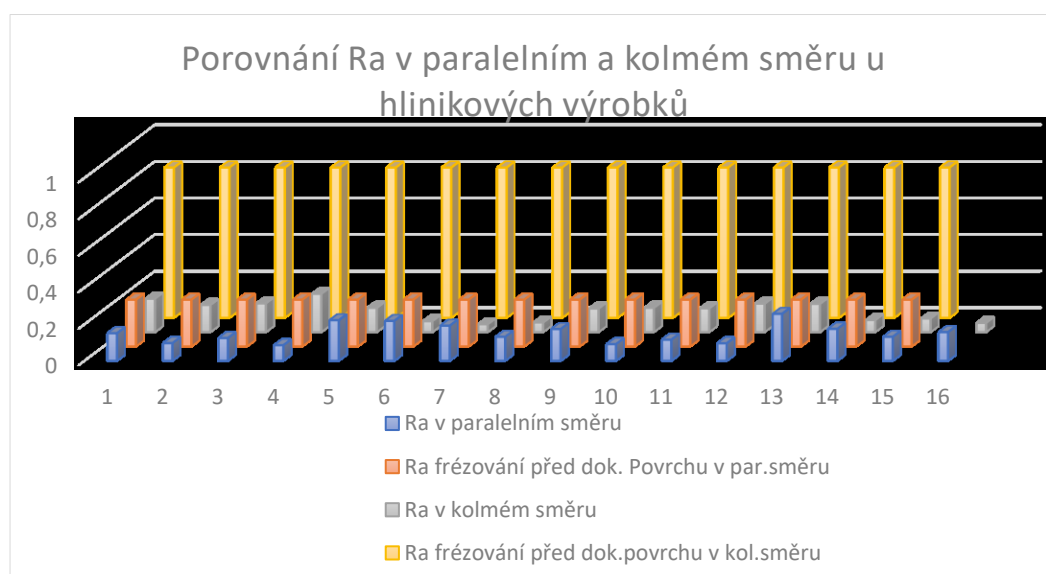
#### 2.4.3. Zlepšení povrchové úpravy konkávních povrchů pomocí hladicího procesu

Na obrobkách s konkávními povrchy dvou různých materiálů byly provedeny různé pokusy: hliník A92017 a ocel G10380. Konkávní povrch obrobku se skládá ze tří oblastí, ve kterých jsou tři křivky 50, 100 a 50 mm. Na každé frézované ploše se provádí proces leštění. <sup>28</sup>

Proces se vždy prováděl v paralelním směru a v kolmém směru. Výsledky parametrů jsou uvedeny v tabulkách 8 a 9. <sup>28</sup>

Tabulka 8 Výsledky měření drsnosti v konkávních hliníkových obrobkách <sup>29</sup>

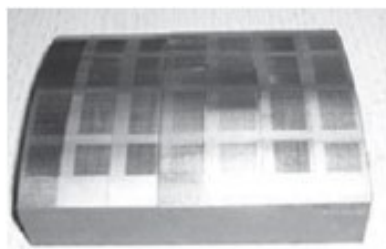
číslo experimentu	r (mm)	v <sub>c</sub> (mm/min)	D směr	Ra // (μm)	Rt // (μm)	Ra ⊥ (μm)	Rt ⊥ (μm)
1	50	200	Par	0,1506	1,0582	0,1827	1,0502
2	100	200	Par	0,0964	1,2843	0,1483	0,7812
3	50	500	Par	0,1243	0,6205	0,1570	0,9910
4	100	500	Par	0,0847	0,8121	0,2090	1,1357
5	50	200	Per	0,2217	1,4248	0,1326	1,4239
6	100	200	Per	0,2179	1,3444	0,0594	0,8050
7	50	500	Per	0,1918	1,2466	0,0431	0,3916
8	100	500	Per	0,1307	1,2764	0,0527	0,9787
9	50	200	Par	0,1731	1,5564	0,1290	1,0432
10	100	200	Par	0,0906	0,9665	0,1327	0,9322
11	50	500	Par	0,1151	0,5554	0,1300	1,0337
12	100	500	Par	0,0953	0,8047	0,1554	1,1627
13	50	200	Per	0,2564	1,6647	0,1540	0,8191
14	100	200	Per	0,1743	1,3073	0,0658	0,5035
15	50	500	Per	0,1306	0,8300	0,0744	0,4634
16	100	500	Per	0,1566	1,2015	0,0503	0,9324
Frézování				0,2557	1,8200	0,8215	3,6271



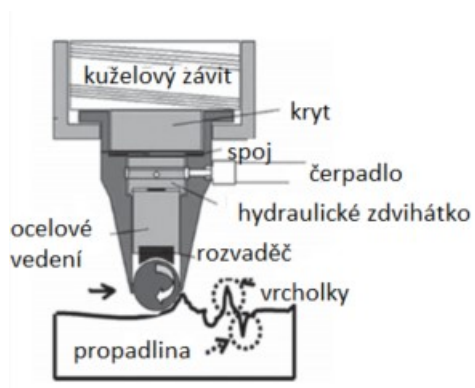
Z grafu můžeme vidět, že metoda byla nejméně účinná, když se dokončovalo v kolmém směru u hliníkových obrobků. Směr leštění, totiž zcela nevyhovoval tomuto materiálu.

#### 2.4.3.1. Analýza měření drsnosti povrchu

	konkávní	
<b>Hliník</b>	Ra // o 77 %	Ra ⊥ o 74 %
	Rt // o 76 %	Ra ⊥ o 60 %
<b>Ocel</b>	Ra // o 90 %	Ra ⊥ o 89 %
	Rt // o 86 %	Ra ⊥ o 86 %



Obrázek 19 Konkávní povrch materiálu A92017 <sup>29</sup>

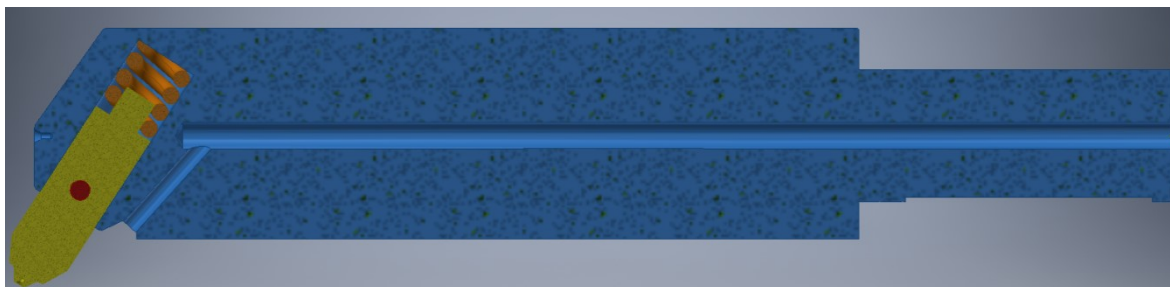


Obrázek 20 Schématické znázornění procesu hlazení <sup>29</sup>

## Dokončovací metody po frézování

Metoda	Materiál	Rychlost [m/min]	Posuv [mm/ot.]	Hloubka záběru [mm]	Ra před [μm]	Ra po [μm]
Ultrazvukový vibrační nástroj	Ti-6Al-4V	60	0,3	0,25	2	0,38
Ultrazvukové leštění	Co-Cr	50	0,05-0,1	0,1	2	0,18
Kombin. obráběcí/hladící nás.	C45	113	0,3	0,5	2	0,203
Leštící nástroj s 12 rovnob.kul.	Uhlíková ocel	60,3	0,11	0,25	2,5	0,2
Hladící nástroj (vnitřní díra)	Aluminum 2014	55	0,45	0,045	3,5	0,22
Hladící nástroj se snímačem	AISI420	60	0,05	0,25	1	0,04-0,06

### 3. Návrh řešené problematiky



Obrázek 21 Schéma navrženého hladicího nože

Na základě vědeckých článků, které rozebírají téměř stejnou problematiku jsem si určil materiál obrobku Aluminum 2014. Zvolil jsem si tento materiál z důvodu, že měl největší rozdíl od původní až po konečnou. Poté jsem určil optimální řezné podmínky dle materiálů nástroje: rychlost hlazení 60 m/min., posuv 0,45mm/ot. a hloubku záběru ( $a_p$ ) jsem volil 0,05mm. Průměr obráběného materiálu jsem si zvolil 40 mm a délku 1000 mm.

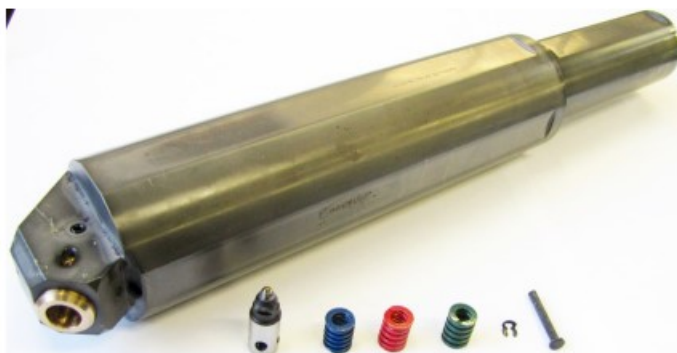
Materiál CuAl10Ni5Fe4, ze kterého se skládá hlavní čep, ve kterém je zasazený diamant je konstrukční a má dobrou odolnost proti korozi, kavitaci a mechanickým opotřebením, a to hlavně při vyšších teplotách. Jeho pevnost dosahuje až 800 Mpa. Kvůli nedostatku zinku a olova v tomto materiálu je velmi důležité odpovídající mazání. U zvolené HSS 19858 je vysoká koncentrace kobaltu, který přispívá ke schopnosti vzdorovat měknutí při teplotě, kdy je rozžhavená do červena. Dále je vynikající pro řezání obtížně zpracovatelných materiálů, kde dochází k vysokému třecímu topení. Konstrukci jsem volil tak, aby byla dobře snímatelná z CNC soustruhu. Díra, která prochází nožem, slouží, aby hladicí emulze došla až co nejbliž k diamantovému hrotu a byl zaručen tak co největší chladicí účinek a nedocházelo tím

k razantnímu opotřebení. Koncepti hlavního čepu jsem navrhnul tak aby nebylo zbytečně moc přechodových ploch, skrz sílu, která při hlazení působí. Ocel 42CrMoS4, kterou jsem přiřadil k malému čepu, který prochází velkým čepem (tento čep je na obrázku 21 znázorněn červenou barvou) sem zvolil proto, že po zakalení dosahuje tvrdosti až 58 HRC. Není náchylná k popouštěcí křehkosti, a hlavně v kaleném stavu odolává dobře opotřebení. Průměr tohoto čepu jsem zvolil o trochu menší než díru, která je pro něj vyvrtána v hlavním čepu skrz tepelnou roztažnost během procesu hlazení. Celou koncepci jsem volil na základě údajů, které nabízí firma Baublies. Váhu informacím podle mého názoru dává to, že firma se touthle problematikou zajímá od roku 1968. Co se týče tvaru diamantu, tak nejčastější koncepce diamantu je v podobě kuličky. Tvar může být i s fazetkou, ale nedosahuje se tak dobré drsnosti povrchu jak u diamantu s tvarem kuličky. Drsnost povrchu se zvyšuje za podmínek menšího poloměru špičky nástroje. Proto poloměr špičky jsem zvolil 4 mm. Důležitou podmínkou v procesu hlazení diamantem, je chlazení. Typ chladicí emulze jsem zvolil EUCUT 0971. Důvod, proč jsem zvolil tuhle emulzi, je takový, že tato emulze zvyšuje příznivě životnost a hlavně zvyšuje rezivost diamantu. Hlava nástroje se do rychlořezné oceli bude nalisovávat a při výměně diamantu nebo pružiny se vytáhne celá hlava, Jestliže by hlava byla připevněná šroubem nebo by na průměru hlavy by byl závit tak, při časté výměně by mohlo dojít k rychlému opotřebení a musela by se hlava také měnit. Na upínací část nástroje sem zvolil tři drážky po devadesáti stupních. Z toho důvodu, aby nástroj mohl hladit jak vnitřní plochy tak i vnější plochy. Tato změna bude spočívat v tom, jakým směrem upneme hrot nástroje. Když bude špička nástroje směřovat vzhůru budou se hladit vnější plochy a když bude směřovat naopak tak bude tak možno hladit vnitřní plochy.



*Obrázek 22 Pružiny s hlavou nástroje*



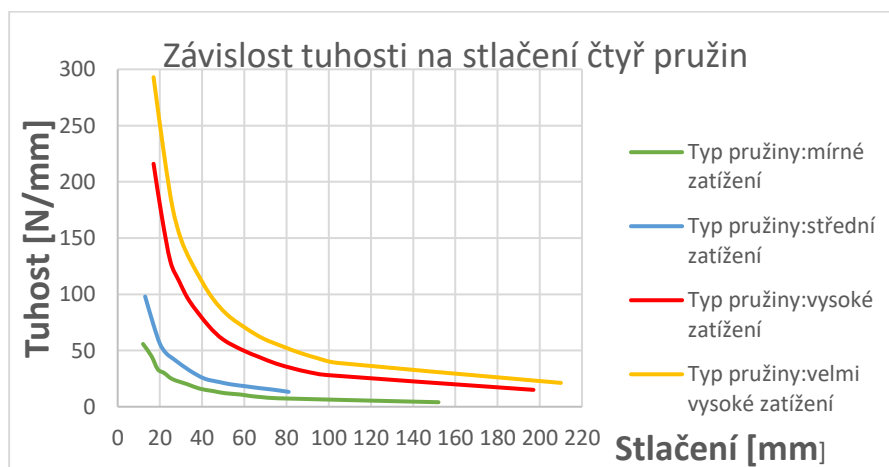


Obrázek 23 Koncepce nástroje

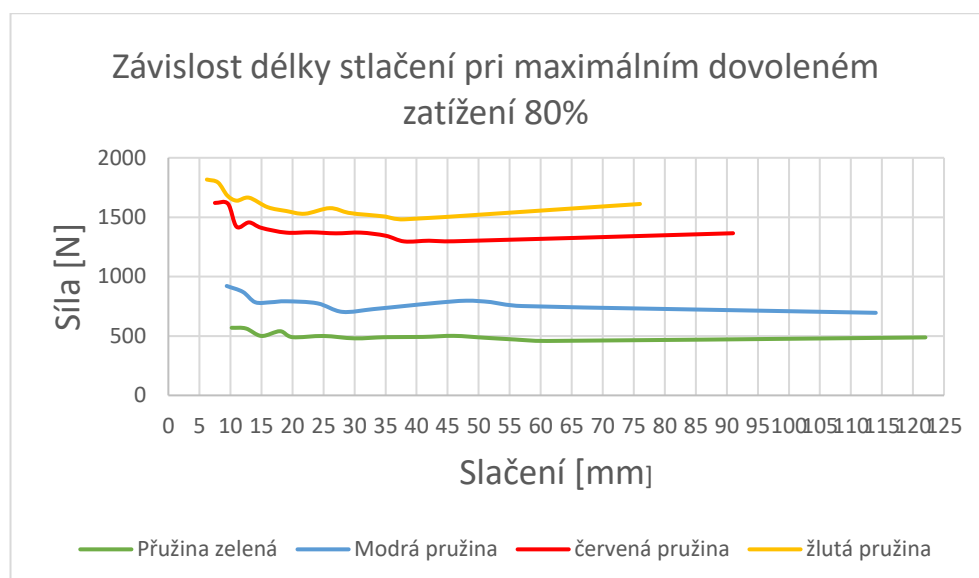
Volba třech drážek po 90 stupních je volena také z toho důvodu, že hlava nástroje není otočná. Otočnou hlavu sem nevolil z toho důvodu, že by docházelo při vyšším posuvu nebo přítlačné síly k nepříznivým vibracím, a to by zhoršovalo výslednou drsnost. Úhel hlavy který je 57 stupňů jsem volil z toho důvodu aby nedocházelo k tak rychlému opotřebení diamantu. Tím pádem nemusí se tak často měnit.

Firma HENNLICH, která vyrábí pružiny, nám dodala do experimentu 4 druhy nástrojových pružin o průměru vodícího pouzdra 20 mm, které byly barevně odstupňovány. První typ je pružina mírné zátěže a má zelenou barvu. Druhá pružina je střední zátěže a má modrou barvu. Třetí typ je pružina vysoké zátěže a má červenou barvu a poslední pružina je velmi vysoké zátěže, která má žlutou barvu. Tyto pružiny mají své specifické vlastnosti a já jsem je porovnal v uvedených grafech:<sup>29</sup>

V prvním grafu můžeme vidět závislost tuhosti pružiny na stlačení. Z grafu vyplývá, že čím větší tuhost má pružina, o to méně se pružina stlačí, když předpokládáme, že je stlačena konstantní silou  $F$ .



V druhém grafu můžeme vidět, o jakou hodnotu se stlačí pružiny při 80 % zatížení, při daných délkách pružin. Délky pružin:25;32;38;44;51;64;76;89;102;115;127;139;152;305 mm



### 3.1. Vlastnosti použitého materiálu

#### 3.1.1. Rychlořezná ocel 19 858

Rychlořezná ocel se vyznačuje tím, že za vysokých teplot má vysokou odolnost proti opotřebení, a to nám zároveň zaručuje dlouhou životnost nástroje. Tato ocel vykazuje dobrou stálostí ostří a odolnost proti opotřebení, což zabraňuje častému ostření, a vlastnost je vyvolána vysokým obsahem vanadu. Typický je pro tuto ocel dost značný obsah kobaltu, který přispívá k tzn. červené tvrdosti, což je schopnost vzdorovat měknutí, při teplotě, kdy je rozžhavená do červena. Ocel dobře prokalitelná v i normálním prostředí. (teplota okolí 21 stupňů Celsia) <sup>32,35</sup>

Tabulka 9 Různá značení této oceli <sup>32,35</sup>

Norma	Značení
Evropská	1.3202
DIN	S12-1-4-5
EN	HS12-1-4-5
AISI/SAE	T15

Aplikace: Vysokorychlostní ocel pro těžké provozy. Otočné nože, frézy, vyhlazení.

Fyzikální vlastnosti: citace <sup>31,32,35</sup>

Vlastnost	Hodnota
Modul pružnosti - E	217 [Mpa]
Tepelná vodivost – Q	19 [W/mK]
Hustota – ρ	8,4 [g/cm <sup>3</sup> ]
Elektrický odpor – R	0,65 [Ohm mm <sup>2</sup> /m]
Spec. Tepel. kapacita – C	0,46 [J/gK]

Koeficient lineární tepelné roztažnosti udává o kolik se zvětší obsah C při postupném ohřívání, když začneme ohřívát vždy na teplotě 20 °C <sup>32,35</sup>

20-100 °C	20-200 °C	20-300 °C	20-400 °C	20-500 °C	20-600 °C	20-700 °C
9,03	10,16	10,68	11,09	11,64	12,08	12,31

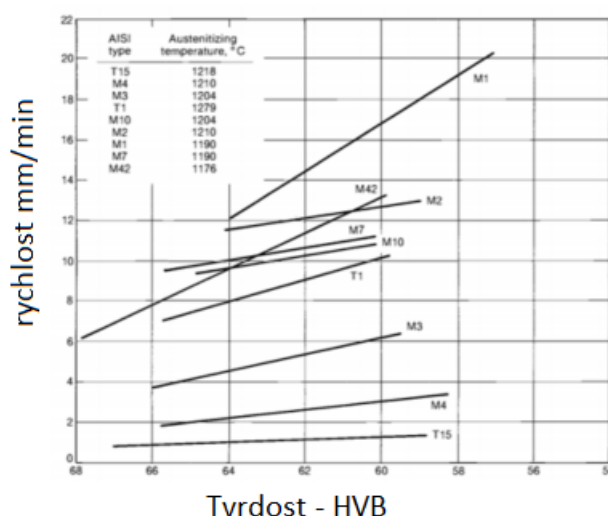
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Ostatní
1,38	max.0,45	max.0,40	4,15	0,85	-	3,75	12	Co: 4,75

Měkké žhání – Ohřev na 820-860 °C, pomalu ochlazujeme v peci. Tím se dosáhne maximální tvrdosti Brinell 280. Následné odlehčení.<sup>32,35</sup>

Odlehčení napětí – Odlehčení napětí (stresu) při odstraňování napětí při obrábění by mělo být prováděno zahříváním na 600-650 °C, přičemž se teplo udržuje po dobu jedné hodiny. Následuje chlazení vzduchem. Tato operace se provádí za účelem snížení deformací při tepelném zpracování.<sup>32,35</sup>

Kalení – V první fázi dojde k předehřívání na teplotu 400 °C, v druhé a třetí fázi dojde napřed předběžnému zahřátí na 850 °C a 1050 °C, teplota vytvrzení je 1190-1240 °C, následně dochází k ochlazování buď pomocí oleje nebo vzduchu nebo v teplé lázni, která má teplotu 550 °C.

Vytvrzení – Temperovací teplota: 3 x při 540-580 °C. Tvrdost po temperaci je 65-67 HRC.<sup>32,33,35</sup>

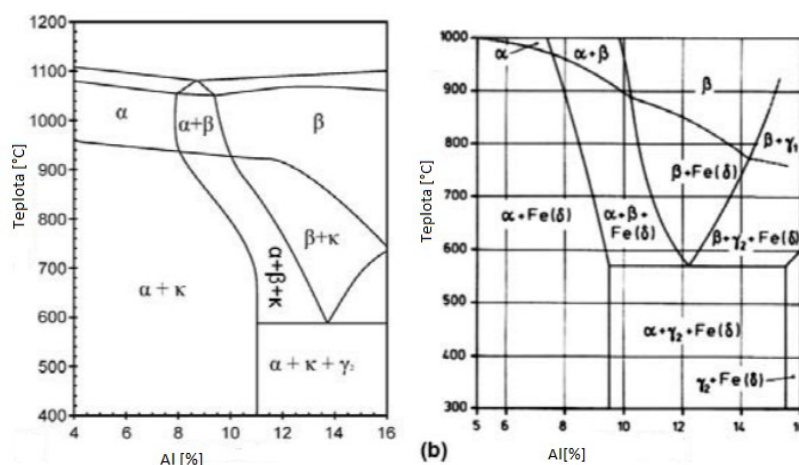


Obrázek 24 Srovnání relativní odolnosti proti otěru při typické pracovní tvrdosti pro vysokorychlostní<sup>30</sup>

### 3.1.2. Hliníkový bronz CuAl10Ni5Fe4

CuAl10Ni5Fe4 hliníkový bronz je slitina mědi, která si zachovává svou vysokou pevnost i při zvýšených teplotách a která má dobrou odolnost proti korozi a vysokou odolnost proti opotřebení. Má dvoufázovou mikrostrukturu skládající se ze špatně tvarovatelné  $\alpha$  fáze a vysokoteplotní  $\beta$ -fáze, která vykazuje vynikající vlastnosti tvarovatelnosti za tepla. Přidání niklu zvyšuje pevnost slitiny, aniž by se snížila jeho vynikající tažnost, houževnatost a odolnost proti korozi. Typické aplikace slitiny obsahují sedla ventilů, špičky plunžrů, hřídele lodního motoru, vodicí ventilů, komponenty letadla hřídelí čerpadel. Slitina vykazuje omezenou tvarovatelnost

za studena (kvůli rychlému vytvrzování), ale má výbornou formovatelnost v oblasti  $\alpha + \beta$ . Doporučené tvářecí teploty jsou mezi 700 °C a 900 °C. V závislosti na rychlosti chlazení a následném tepelném zpracování fáze  $\beta$  může procházet martenzitickou transformací do nestabilní fáze  $\beta'$ , která je velmi tvrdá a křehká, zvyšuje pevnost a snižuje tažnost materiálu. Fáze  $\gamma_2$  slitiny obsahující méně než 11,8 % hliníkových forem během pomalého ochlazování nebo v průběhu žhání při teplotě pod 565 °C. Tyto fáze zvyšují pevnost a snižují tažnost slitiny. Mikrostruktura se proto skládá z fáze  $\alpha$  a  $\alpha + \beta + \gamma_2$  eutektoid, jak je vyznačeno ve fázovém diagramu.<sup>34</sup>



Obrázek 25 Fázový diagram<sup>37</sup>

Bylo klasifikováno několik typů fází kappa: zdroje uvádějí čtyři typy, označené jako  $\kappa_I$ ,  $\kappa_{II}$ ,  $\kappa_{III}$  a  $\kappa_{IV}$ . Fáze  $\kappa_I$  tvoří velké částice dendrického tvaru, které jsou bohaté na Fe, které se skládají z  $\text{Fe}_3\text{Al}$  s Cu a Ni a krychlové struktury  $\text{DO}_3$ . Fáze  $\kappa_{II}$  tvoří menší globulární částice s identickým složením a strukturou  $\kappa_I$ . Fáze tzv. precipitace  $\kappa_{III}$  mají kubickou strukturu a tvar má lamelový. Částice  $\kappa_{IV}$  jsou malé sraženiny založené na  $\text{Fe}_3\text{Al}$ . Složení fáze  $\gamma_2\text{Cu}_9\text{Al}_4$  a jeho struktura je krychlový typ T-43m. V případě vysokých nároků na tvrdost a opotřebení musí být dodrženy vysoké aluminiové bronzy Cu-Al-Fe s obsahem uhlíku nad 13% a obsahem železa až 5%. Mikrostruktura této slitiny se skládá ze dvou fází, jak je znázorněno na diagramu číslo 2 ( $\alpha$  a  $\gamma_2$ ). Vysoká tvrdost této slitiny je způsobena těmito slutinami  $\gamma_2$  fáze, která taky vykazuje vysokou tvrdost a křehkost, ale nižší odolnost proti korozi. Tato kompozice má dobrou odolnost proti škrábancům, erozi, což je odolnost proti plošné korozi a kavitaci, což je odolnost proti oddělování částic z povrchu materiálu.<sup>37</sup>

### 3.1.3. 42CrMo4 – Nízkolegovaná ušlechtilá chrom – molybdenová ocel

Tabulka 11 Druhy značení citace 39

Norma	Značení
Dle ČSN	15 142
Dle DIN	38HM
Dle ASTM A29	4140

Ocel s vyšší prokalitelností pro výše namáhané strojní díly. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 58 HRC. Není náchylná k popouštěcí křehkosti. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení. Patří k nejčastěji používané oceli k zušlechťování. Legovaná ocel je široce používána pro strojírenské účely, jako je: výroba různých druhů strojů, automobilů, těžebních náhradních dílů, ozubených kol motorů, pohonů kompresorů, spojovacích robotů, kolíků pod vysokým tlakem, díly pro aplikace hnacího ústrojí, komponenty upevňovacích prvků za studena, hřídele, ozubená kola a vrtáky pro průzkum ropy. <sup>39</sup>

Tabulka 12 Mechanické vlastnosti 15 142 <sup>39</sup>

Velikost $\varnothing$ [mm]	Zátěžový stres Rp0,2, Mpa, min	Konečné namáhání v tahu Rm, Mpa	Prodloužení A <sub>5</sub> , %, min	Tvrdość HB	Houževnatost KV, Joule, min
<40	750	1000–1200	11	295–355	35 při 20°C

### 3.1.4. Navrhnutí tepelných zpracování u použitých materiálů

Ocel 19858 - Navrhují tepelné zpracování kaleno při teplotě 1240 °C/v oleji, tím se dosáhne značného zvýšení odolnosti proti korozi, 4krát popuštěno na teplotě 570 °C a následné samovolné ochlazení na vzduchu asi 45minut. Žihání na odstranění pnutí se u této oceli nedoporučuje z toho důvodu, že by došlo ke snížení tvrdosti a houževnatosti, což je pro tuto ocel nepříznivé. <sup>35</sup>

Hliníkový bronz—U této slitiny volím rozpouštěcí žihání na teplotu 1100 °C a následné chlazení asi hodinu a půl. Tímto procesem se zabrání vzniku vysokých vnitřních pnutí v důsledku vzniku vysokého gradientu teplot a tím zabránění případného poškození tepelně zpracovaného dílu. <sup>40</sup>

Ocel 15 142 – Doporučuje se pomalé ohřátí na teplotu 880° C, po dosažení této teploty se namáčí tento materiál do oleje. Temperuje se, až ocel dosáhne pokojové teploty (20 °C). Poté se opětovně zahřeje pomalu na teplotu 560° C. Po normalizačním žihání dochází ke zvýšení tvrdosti (teplota tohoto žihání je 680 až 720 °C) <sup>39</sup>

#### 4. Technicko – ekonomické zhodnocení

Základní a velkou výhodou hladicího nástroje je, že oproti běžným dokončovací metodám odpadají manipulační operace, to znamená dost značné ulehčení práce. Samotný diamant má vysokou životnost, avšak lze několikrát přebrousit a bude mít stále stejné vlastnosti hlazení. Jakmile diamant nelze už přebrousit, stačí samotný diamant vyměnit a nemusí se měnit celá hlava nástroje. Hlazení diamantem materiál zpevňuje, a proto je možné jej použít k výrobě některých součástí i méně hodnotné oceli, čímž ušetříme na drahých legovaných přísadách a tepelném zpracování. Konstantní rozměry a výborná drsnost je též předností této metody.

##### 4.1. Pořizovací náklady nástroje

cena 1 kg	Název	rozměry [mm]	Cena [Kč]
500kč/kg	Hlinitý bronz	25 x 1000	1940
470kč/kg	Rychlořezná ocel	70 x 350	5100
44,5kč/kg	Ocel 15 142	10 x 1000	30
	1,5ct hladicí diamant		7990
		Σ	14970

Tabulka je uvedena bez práce pracovníka na CNC.

U pořizovacích nákladů můžeme vidět, že  $\frac{3}{4}$  tvoří cena diamantu. V tabulce jsou délky polotovarů udávány v metrech, protože firmy jiné délky nenabízejí, ale vyhovují tím, že daný polotovar mohou nařezat dle libosti zákazníka tak, jak on sám potřebuje. Na požádání firmy Taixie Group Limited mi byly poslány přesné informace o rychlořezné oceli a nabídli mi i přesnou délku 350 mm, takže bych nemusel kupovat 1000 mm, jak udávají české firmy. Celkovou cenu získáme, když připočítáme k cenám materiálu sazbu pracoviště soustruhu, na kterém se obráběly materiály na dané rozměry 56 minut, a jako poslední položku připočteme práci pracovníka (zaokrouhlíme hodinu práce pracovníka na 250Kč/h). Výjde nám po sečtení celková cena 15220 Kč.

##### 4.2. Doba výroby nože

Materiál	čas
Hlinitého bronzu	17minut 10 sekund
HSS	36 minut 15 sekund
AISI 4140	2 minuty 35sekund
Σ	56 minut

Poté, co jsou dokončeny všechny díly, následuje sestavení nože do celé sestavy. Tzn. vezmu součást z hlinitého bronzu a na koncovou část o Ø 10 mm nasadím pružinu, obě tyto komponenty vložím do díry o Ø 20g6 mm, která je v rychlořezné oceli až na doraz. Následně vložím malý čep z nerezové oceli do průměru 6,2 mm, který je v rychlořezné oceli až na doraz a pojistím „ségrovkou“ (pojistný kroužek) proti vysunutí tohoto čepu, a tak zabráním rozpadu celé sestavy.

### 4.3. Náklady výroby broušením

Přípravný čas	50	min
Celkový čas	150	min
Sazba pracoviště pro brusku	11,3	Kč/min
Celkové náklady	2260	Kč

Celkové náklady:

$$N_b = (50 + 150) \cdot 11,3 = 2260 \text{ Kč}$$

### 4.4. Náklady výroby hlazením

Přejetí plochy	40	min
Výměna nástroje	3	min
Sazba pracoviště pro CNC	15,8	Kč/min
Celkový čas dokončení	99	min
Náklady na leštění plochy	1564,2	Kč

Do nákladů se započítá dvakrát přejetí plochy dokončovací nástrojem.

Celkový čas dokončení:

$$T_c = (3 + 2 \cdot 20) \cdot 1,2 = 99 \text{ min}$$

Kde 1,2...koeficient směnového času

Náklady na leštění plochy:

$$N_p = 99 \cdot 15,8 = 1564,2 \text{ Kč/ks}$$

### 4.5. Porovnání metod

Celkové náklady u broušení	2260	Kč/ks
Celkové náklady u hlazení	1564,2	Kč/ks
Rozdíl obou metod	695,8	Kč/ks

V případě hlazení diamantem došlo ke značnému snížení mezioperačních času, a to ovlivnilo celkovou cenu procesu o 695,8 Kč. Metoda hlazení diamantem je tedy potvrzena, že je ekonomicky, a i z pohledu výsledné drsnosti lepší.



## 5. Závěr

V rámci teoretické části, která se zabývala dokončovacími metodami obrábění, jsem rozebral každou metodu a uvedl v grafech, jakých hodnot tvrdosti a drsnosti se jimi dosahuje. Dále jsem uvedl vlastnosti pružin, které nabízí německá firma Baublies a porovnal závislosti mezi jejími parametry. V následující části jsem rozebral tři metody, kterými se zabývali vědci přede mnou o procesu dokončování povrchů pomocí diamantu. Tyto anglické články uvádějí, jakým způsobem byla provedena metoda a co pomohlo tomuto procesu, aby došlo z počáteční drsnosti na výslednou drsnost. A byly navrženy ideální řezné parametry, kterými jsme dosáhli výsledné drsnosti. Poté jsem uvedl některé závislosti mezi parametry, které výrazně ovlivnily výsledné vlastnosti povrchu.

Hlavní část, kterou se zabývá tato práce, je návrh dokončovacího nástroje tak jeho koncepce, tak určení ideálních řezných podmínek. Koncepci jsem volil na základě podkladů, které mi poskytla firma Baublies, jež se touto problematikou zabývá, dle uvedených vlastností materiálů, které jsem zvolil, jsem odůvodnil, proč jsem volil takové materiály a jaké tepelné zpracování by měly podstoupit tyto materiály. Vše tohle jsem vzal v úvahu a určil ideální řezné podmínky pro materiál, aby došlo k jejich zlepšení pro proces (volený materiál: AlCu4SiMg). Také jsem uvedl důvod, proč jsem nevolil otočnou hlavu, která je sklopená o 23 stupňů. Toto sklopení by mělo zabránit opotřebení diamantu a nepříznivým vibracím. Celá koncepce je uvedena v přílohách, které jsou na konci této práce

V poslední části této práce jsem určil odhad, kolik bude stát samostatný navržený nástroj a jak dlouho se bude vyrábět a kolik se ušetří, když použijeme tento nástroj na proces hlazení místo broušení. I když pořizovací cena tohoto nástroje je značně vyšší, v procesu hlazení dochází ke značnému ušetření peněz a dosáhne se hlavně vyšších hodnot tvrdosti a nižších hodnot drsnosti, které proces výroby stále víc zpřísňuje. Oproti dokončovacím metodám se dosáhlo těchto předpokladů. A tím se potvrzuje, že nástroj se vyplatí koupit a používat ho.

## 6. Citace

1. MÁDL, Jan. Technologie obrábění. 1. díl. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02091-6.
2. MÁDL, Jan. Technologie obrábění. 3. díl. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02091-6.
3. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. Strojírenská technologie 3. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-207-3.
4. HUMÁR, Anton. Technologie obrábění – 3. část. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2005 [online]. [vid. 2018-03-15]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
5. KOCMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. Technologie obrábění. druhé. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
6. MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník. Novinky v povrchových úpravách: Izotropní superfinišování. [online]. Praha: MM Publishing, 2008, (4), [cit. 2018-05-11]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-v-povrchovych-upravach.html>
7. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. Technologie obrábění: 5 BROUŠENÍ A DOKONČOVACÍ OPERACE OBRÁBĚNÍ. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3012-4.
8. NĚMEC, Dobroslav a kol. Strojírenská technologie 3: Strojní obrábění. 2., opr. vyd. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
9. Used beer keg restoration process. PILSENA [online]. 2013 [vid. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.used-kegs.com/>
10. RPA America's Finishing Experts . Tumble Finishing Process. [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://rpabrasives.com/resources/tumble-finishing-process/>
11. MM Průmyslové spektrum: technický měsíčník. Tryskání zvlhčeným abrazivem: Funkční schéma tryskání zvlhčeným abrazivem [online]. Praha: MM Publishing, 2009, (4), [cit. 2018-03-15]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tryskani-zvlhcenym-abrazivem-2.html>
12. MÁDL, Jan; KAFKA, Jindřich; VRABEC, Martin; DVOŘÁK Rudolf. Technologie obrábění – 3. díl. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 81 s. ISBN 80-01-02091-6
13. VAJSKEBR Jiří; ŠPETA Zdeněk. Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1984. 184 s.
14. PÍŠKA, Miroslav, a kolektiv.: Speciální technologie obrábění. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
15. Baublies Surface technology: Rolovací nástroj kompaktní [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://www.baublies.com/datenblatt-kompakt.html>
16. KOCMAN, Karel, Technologické procesy obrábění. 1st ed. Brno : Akademické nakladatelství cem, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2

17. JEREZ - MESA, Ramon, R, Giovanni GÓMEZ - GRAS a Jordi LLUMÁ. Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2018 [cit. 2018-05-08]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/323574159>
18. IBRAHIM, A.A. An investigation into ball burnishing process of carbon Steel on a lathe [online]. 2015 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/266342319>
19. ZEMČÍK, Oskar. Změna vlastností oběžných drah valivých ložisek po aplikaci válečkování: Zbytková napětí v povrchové vrstvě a jejich měření [online]. 2014 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/47099178>
20. BRINKSMEIER, E., J.T. CAMMETT a P. LESKOVAR. Residual Stresses - Measurement and Causes in Machining Processes: Deformations by Residual Stresses [online]. 1982 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/64d4/6400817f37069657fcbc3ead970df1da8b63.pdf>
21. WITHERS, P.J a H.K.D.H BHADESHIA. Residual stress. Part 1 – Measurement techniques: Causes residual stress [online]. 2001 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>
22. Humár, Anton. Vysoké učení technické v Brně. Odbor technologie obrábění - studijní opory. Technologie I - Technologie obrábění - 1. část. [Online] 2003. [Citace: 5. 5 2015.] Dostupné na World Wide Web: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf).
23. GANEV, Nikolaj a Ivo KRAUS. Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí: Mřížková deformace [online]. Praha [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.xray.cz/xray/csca/kol2002/doc/nikolaj\\_ganev2.htm](http://www.xray.cz/xray/csca/kol2002/doc/nikolaj_ganev2.htm)
24. Princip rentgenové strukturní analýzy: Princip difrakce [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.rtg.wz.cz/princip.html>
25. GEOMETRICKÉ PRINCIPY DIFRAKCE: Braggův zákon. Xray.cz [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.xray.cz/krystalografie/rejstrik/rejst68.htm>
26. ZÁHORA, J., Š. LÝSKOVÁ a T. JAKUBEC. Difrakce elektronu: Braggův vztah odvození. Tydenvedy [online]. Brtnál [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2012/cd/prispevky/sbpdf/difrel.pdf>
27. GHARBI, Fathi, Salem SGHAIER, Khaled J AL-FADHALAH a Tarek Tijani BENAMEUR. Effect of Ball Burnishing Process on the Surface Quality and Microstructure Properties of AISI 1010 Steel Plates: Experimental work. Journal of Materials Engineering and Performance [online]. 2011 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/226228158>
28. TRAVIESO - RODRIGUEZ, J.A., Gilles DESSEIN a Herman A. GONZÁLEZ ROJAS. Improving the Surface Finish of Conkave and Convex Surfaces Using a Ball Burnishing Process: Experimental work. Materials and Manufacturing Processes [online]. 2011 [cit. 2018-05-07]. ISSN 1532-2475. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/233094152>
29. Hennlich s.r.o [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.hennlich.cz/index.php?id=1329&debug=1&tx\\_commerce\\_pi1%5BcatUid%5D=248&tx\\_commerce\\_pi1%5BshowUid%5D=&tx\\_commerce\\_pi1%5Bpath%5D=248%2C77&tx\\_commerce\\_pi1%5BmDepth%5D=2&cHash=853e67a5a2765bfcc6365d921c45b952](https://www.hennlich.cz/index.php?id=1329&debug=1&tx_commerce_pi1%5BcatUid%5D=248&tx_commerce_pi1%5BshowUid%5D=&tx_commerce_pi1%5Bpath%5D=248%2C77&tx_commerce_pi1%5BmDepth%5D=2&cHash=853e67a5a2765bfcc6365d921c45b952)

30. High.Speed Tool Steels [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: [https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06022g\\_sample.pdf](https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06022g_sample.pdf)
31. Schmolz-bickenbach.cz [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: [https://www.schmolz-bickenbach.cz/pdf/GB\\_Rapidur3202.pdf](https://www.schmolz-bickenbach.cz/pdf/GB_Rapidur3202.pdf)
32. Bolzano.cz: NÁSTROJOVÁ OCEL CPM® REX T15 [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/Nove\\_NO/Materialove\\_listy/mater\\_listy\\_pras\\_metalur/CPMRexT15.pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/Nove_NO/Materialove_listy/mater_listy_pras_metalur/CPMRexT15.pdf)
33. Tepelné zpracování rychlořezných ocelí [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: [https://www.old.fst.zcu.cz/files\\_web\\_FST/SP\\_FST\(SVOC\)/2011/sbornik/PapersPdf/Bc/Martinec\\_Lukas.pdf](https://www.old.fst.zcu.cz/files_web_FST/SP_FST(SVOC)/2011/sbornik/PapersPdf/Bc/Martinec_Lukas.pdf)
34. Schreier-metall.de [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.schreier-metall.de/en/product-range/aluminiumbronze.html>
35. Steelselector.sij.si [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://steelselector.sij.si/steels/BRCV.html>
36. Matmach.com [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [https://matmatch.com/search?filters\[0\]\[name\]=secondLevelCategory&filters\[0\]\[filterValue\]=Aluminium&filters\[0\]\[type\]=materialProperty&filters\[0\]\[suggestionCategory\]=secondLevelCategory&gclid=Cj0KCQjw3InYBRCLARIsAG6bfMTNuOBH1vEJIILAmLyPlbaC32OpukBeWuCGsx05ltdRffvJZ6BcBoZcaAj18EALw\\_wcB](https://matmatch.com/search?filters[0][name]=secondLevelCategory&filters[0][filterValue]=Aluminium&filters[0][type]=materialProperty&filters[0][suggestionCategory]=secondLevelCategory&gclid=Cj0KCQjw3InYBRCLARIsAG6bfMTNuOBH1vEJIILAmLyPlbaC32OpukBeWuCGsx05ltdRffvJZ6BcBoZcaAj18EALw_wcB)
37. 1 ASM Handbook Volume 02: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1990
38. Astmsteel.com: Properties 42CrMo4 [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.astmsteel.com/product/42crmo4-alloy-steel/>
39. Bolzano.cz: Heat treatment [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: [https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP\\_%20Tycova\\_ocel/EN\\_10083/MOP\\_vlastnosti\\_42CrMo4.pdf](https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf)
40. Alunet.cz: Tepelné zpracování slitin [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/tepelne-zpracovani>

## 7. Přílohy

Příloha A1

Výrobní výkres: Čep – Malý

Příloha B1

Výrobní výkres: Čep – Hlavní

Příloha C1

Výrobní výkres: Držák

Příloha D1

Výrobní výkres: Sestava – Dokončovacího nástroje